

FACULDADE DE ENGENHARIA  
DA UNIVERSIDADE DO PORTO

LEONARDO SANTANA



**AVALIAÇÃO DAS CAPACIDADES DA IMPRESSÃO 3D DE BAIXO CUSTO NA  
FABRICAÇÃO DE *SNAP-FITS*: UMA RELAÇÃO DE RECONHECIMENTO  
USUÁRIO-SISTEMA DE IMPRESSÃO**

Orientador: Fernando Jorge Lino Alves (Dr./FEUP - Portugal)

Coorientador: Aurélio da Costa Sabino Netto (Dr. Eng./IFSC-Brasil)

Programa Doutoral em Engenharia Mecânica

Porto

2019



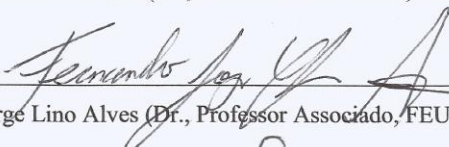
Leonardo Santana

**AValiação das Capacidades da Impressão 3D de Baixo Custo na  
Fabricação de SNAP-FITS: Uma Relação de Reconhecimento  
Usuário-Sistema de Impressão**

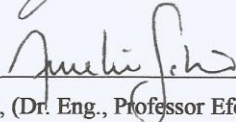
Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor”, e aprovada em sua forma final pelo Programa Doutoral em Engenharia Mecânica (PRODEM) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).



José Manuel de Almeida César Sá (Dr., Professor Catedrático, FEUP) - Diretor do curso.



Fernando Jorge Lino Alves (Dr., Professor Associado, FEUP) - Orientador.

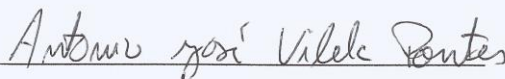


Aurélio da Costa Sabino Netto, (Dr. Eng., Professor Efetivo, IFSC/Brasil) - Coorientador.

**Banca Examinadora:**



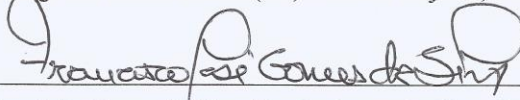
António Augusto Fernandes (Dr., Professor Catedrático, FEUP) – Presidente.



António José Vilela Pontes (Dr., Professor Associado, UMinho)



Artur Jorge dos Santos Mateus (Dr., Professor Adjunto, IPL)



Francisco João Gomes da Silva (Dr., Professor Auxiliar, ISEP)

Porto, 3 de julho de 2019.





A Deus,  
a minha companheira Marina,  
aos meus pais Luciano e Glaucia,  
ao Brasil.



## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, Brasil, pelo financiamento integral da pesquisa doutoral, através do programa Ciência sem Fronteiras. Ao meu orientador, Professor Jorge Lino, pela confiança desde o primeiro contato até o fim desta tese, pela liberdade de ideias, e pelo respeito com o qual sempre me tratou; sem dúvidas é um importante colaborador da comunidade *maker* da Impressão 3D. Ao Professor Aurélio da Costa Sabino Netto, meu coorientador, a quem tenho muito a agradecer, pois é um dos responsáveis pela minha caminhada desde a iniciação científica até o doutorado. Considero, além de um mestre, um amigo.

Aos Professores Erwin Werner Teichmann e Bernardo Rachadel, aos quais serei grato para sempre, pela primeira oportunidade como pesquisador, na iniciação científica, ainda como aluno de Mecatrônica no IFSC. Ao Professor Carlos Henrique Ahrens, pela colaboração na minha formação como Mestre em Engenharia Mecânica pela UFSC, e agora por nos ajudar com a análise de DMA.

A minha companheira Marina, por aceitar este desafio, e me ajudar com carinho e amor ao longo desta etapa.

A Professora Cláudia Merlini, que sempre prestativa, me ajudou com as análises de caracterização dos polímeros. Ao amigo e pesquisador Cláudio, que mesmo longe, sempre ajudou quando foi solicitado. Aos amigos da T11, Matheus, Gustavo e Wellington, pela parceria.

Ao grande amigo Edwin, pela amizade e carinho dentro e fora da universidade, que me ajudaram a suprir a falta da família. Ao André e ao Bruno, companheiros do cafezinho e das boas conversas. A todos os demais colegas do LDPS.

A Carla Monteiro, a quem agradeço a ajuda nas questões burocráticas, e elogio a eficiência e alegria na condução do seu trabalho, um exemplo a ser seguido. Ao INEGI, em especial aos colaboradores, Beatriz Graça, Marta Dias, Susana Sousa, e Ramiro Martins, que ajudaram com alguns dos ensaios realizados. Ao Professor Cesar Sá, pela ajuda nas questões do programa doutoral.

Ao Professor Augusto Fernandes, que ao idealizar o LDPS colaborou para o desenvolvimento de pesquisas na área da Manufatura Aditiva na FEUP, permitindo assim a elaboração desta tese, visto que nos últimos anos estive alocado em tal estrutura.

Ao Professor António Pontes, da UMINHO, pela ajuda com o MFI. Ao Professor Artur Mateus e a Sra. Margarida Franco, do IPL, pela colaboração com as análises de microCT. Ao Professor Carlos Sá e a Daniela Silva, do CEMUP, pela ajuda com o MEV. Ao CENTIMFE pelas amostras em SLS.

Aos meus familiares, e especial aos meus pais Luciano e Glaucia, e aos pais da Marina, Celso e Lilian, que se esforçaram para sempre nos visitar e trazer um pouco do Brasil para nós. A minha amiga e companheira de luta, Impressora Prusa.

Aos membros do Júri pela leitura e arguição desta tese, e à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC-Florianópolis).



## RESUMO

A expansão das pesquisas acadêmicas e industriais e as melhorias nos equipamentos e materiais utilizados permitiram a consolidação da Manufatura Aditiva (MA) como um conjunto de tecnologias para a fabricação de produtos finais. Além disso, outra revolução no âmbito das técnicas foi o avanço dos sistemas baseados em extrusão, motivado por movimentos de código aberto e alternativas de baixo custo, para o ambiente doméstico, popularizando o processo. Contudo, a inserção de usuários não especialistas no âmbito descrito expõe dificuldades inerentes à Impressão 3D: calibração dos parâmetros de construção e seleção de materiais. No desenvolvimento de produtos, o projeto para montagem é fundamental e, neste cenário, o uso de conexões de encaixe rápido, como os *snap-fits*, é desejável. Estes elementos apresentam geometrias complexas e, portanto, apropriadas para a construção por MA, o que vem sendo explorado, principalmente, no universo das técnicas de alto custo. Diante do referido contexto, dois aspectos motivaram o desenvolvimento desta tese de doutorado: (i) como inserir a Impressão 3D por extrusão, e baixo custo, na fabricação de *snap-fits*, e (ii) como auxiliar usuários a lidar com as variáveis envolvidas no sistema. Para tal, este trabalho foi desenvolvido em duas etapas experimentais. A primeira teve como objetivo fragmentar e simplificar o problema da pesquisa em uma série de estudos preliminares com o intuito de: (i) mapear as dificuldades associadas à impressão de conexões *snap-fit* pela tecnologia em questão; (ii) calibrar os parâmetros de processo com base na análise dimensional (externa e interna) e de forma (por escaneamento 3D), e selecionar os filamentos poliméricos; (iii) caracterizar os materiais, térmica, química e mecanicamente (através de peças impressas e injetadas); (iv) avaliar a qualidade das superfícies fabricadas, mediante medição da rugosidade e do coeficiente de atrito. As etapas fundamentaram-se no uso de procedimentos metodológicos de Taguchi e fatorial completo, em conjunto com os materiais Poli(ácido láctico) (PLA) e Poli(tereftalato de etileno glicol) (PETG). O segundo momento da tese foi dedicado à análise de desempenho das conexões *snap-fit* impressas, nos polímeros citados, com base em: (i) medição da força de inserção, em ciclos, e em condições de menor e maior atrito entre partes; (ii) avaliação dos mecanismos de falha por tomografia e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV); (iii) caracterização de peças impressas em PLA e PETG por Análise Dinâmico Mecânica (DMA). Os resultados dos estudos demonstraram que é possível a fabricação e o uso de conexões *snap-fit* por Impressão 3D baseada em extrusão, principalmente para produtos customizados, desde que se utilize um material com propriedades adequadas como as apresentadas pelo PETG, isto é, flexibilidade e capacidade de armazenamento de energia. A tese permitiu também o desenvolvimento de um passo a passo, denominado “relação de reconhecimento usuário-sistema de impressão”, que se fundamenta em quatro palavras, desconhecimento, aproximação, experimentação e constatação, e que pode ser utilizada para o desenvolvimento de pesquisas que visam a aplicação da tecnologia em peças finais.

**Palavras-chave:** Impressão 3D, extrusão, *snap-fits*, PLA, PETG, relação de reconhecimento.



## ABSTRACT

The expansion of academic and industrial researches, and the improvements in equipment and in the materials used allowed the consolidation of Additive Manufacturing (AM) as a set of technologies to produce final products. In addition, another revolution in the field of these techniques was the advancement of extrusion-based systems, motivated by open source movements and low-cost alternatives, to the domestic environment, popularizing the process. However, the participation of non-expert users in the described context exposes difficulties inherent in 3D printing: calibration of building parameters and selection of materials. Within product development, design for assembly is critical, and in this scenario, the use of snap-in connections, such as snap-fits, is desirable. These elements present complex geometries and, therefore, are suitable to be built by AM, which is being explored, mainly, in the universe of high cost techniques. Considering this context, two aspects motivated the development of this doctoral thesis: (i) how to insert low cost extrusion-based 3D printing in the manufacture of snap-fits, and (ii) how to help users to deal with the variables involved in the system. In order to fulfill these goals, this work was divided in two experimental stages. The first one aimed to fragment and simplify the research problem in a series of preliminary studies to: (i) map the difficulties associated with the printing of snap-fit connections by the technology investigated; (ii) calibrate the process parameters based on the dimensional analysis (external and internal) and shape (by 3D scanning), and select the polymer filaments; (iii) characterize the materials, thermally, chemically and mechanically (through printed and injected molding parts); (iv) to evaluate the quality of the manufactured surfaces, by measuring the roughness and friction coefficient. The steps were based on the use of complete Taguchi and factorial methodological procedures, together with the materials Poly (lactic acid) (PLA) and Poly (ethylene terephthalate glycol) (PETG). The second step of the thesis was dedicated to the performance analysis of the printed snap-fit connections, built with the mentioned polymers, based on: (i) measurement of the insertion force, in cycles, and in conditions of minor and greater friction between parts; (ii) evaluation of failure mechanisms by tomography and Scanning Electron Microscopy (SEM); (iii) characterization of printed parts in PLA and PETG by Dynamic Mechanical Analysis (DMA). The results of the studies demonstrate that it is possible to manufacture and use extrusion-based 3D printed snap-fit connections, especially for customized products, as long as the user selects a material with suitable properties such as those presented by PETG, ie flexibility and energy storage capacity. The thesis also allowed the development of a step-by-step method, called "user-print recognition relationship", based on four terms, unfamiliarity, approximation, experimentation and verification, and which can be used in researches that aim at the application of the technology to build final parts.

**Keywords:** 3D printing, extrusion, *snap-fits*, PLA, PETG, recognition relationship.





## **BIBLIOGRAFIA E APRESENTAÇÕES EM EVENTOS GERADAS A PARTIR DA TESE**

- (1) SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino; NETTO, Aurélio da Costa Sabino. Aplicação da Impressão 3D de Baixo Custo na Fabricação de Peças com Conexões Snap-Fit. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 9., 2017, Joinville. **Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Joinville, 2017: ABCM, 2017.
- (2) SANTANA, Leonardo; ALVES, Fernando Jorge Lino; NETTO, Aurélio da Costa Sabino. Impressão 3D: os desafios da utilização de máquinas de baixo custo no fabrico de conexões snap-fit. **Revista Robótica: Automação, Controle, Instrumentação**, Porto, n. 107, p.22-25, jun. 2017. Trimestral.
- (3) SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino, NETTO, Aurélio da Costa Sabino. Low Cost 3D Printing Applied to Design For Assembly: Bulding Snap-Fits. In: DOCTORAL CONGRESS IN ENGINEERING, 2, 2017, Porto. **(Best Poster Communication Award)**.
- (4) SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino; NETTO, Aurélio da Costa Sabino. A study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality. **Materials & Design**, v. 135, p.159-172. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.020>>. Acesso em: 14 set. 2017.
- (5) SANTANA, Leonardo et al. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 4. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0601>>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- (6) SANTANA, Leonardo; NETTO, Aurélio da Costa Sabino, ALVES, Jorge Lino. Impressão 3D por extrusão aplicada à fabricação de conexões *snap-fit*. In: SEMINÁRIO DE FABRICO ADITIVO: INVESTIGAÇÃO EM CURSO NO INEGI E FEUP, 1, 2019, Porto.
- (7) SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino; NETTO, Aurélio da Costa Sabino. PLA and PETG applied to extrusion-based 3D printed snap-fit connections for product assembly. In: 2<sup>ND</sup> ANNUAL CONFERENCE ON 3D PRINTING & ADDITIVE MANUFACTURING, 2, 2019, Dubai.
- (8) SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino; NETTO, Aurélio da Costa Sabino. Dimensional Analysis of PLA and PETG Parts Built by Open Source Extrusion-Based 3D Printing. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO (COBEF), 10, 2019, São Carlos - SP. Agosto de 2019. **Aceito para publicação.**

## DISPOSIÇÃO DOS ARTIGOS NA TESE

<b>Título do artigo</b>	<b>Local de Publicação</b>	<b>Capítulo/Seção</b>
Aplicação da Impressão 3D de Baixo Custo na Fabricação de Peças com Conexões Snap-Fit	Anais do COBEF 2017 (SANTANA <i>et al.</i> , 2017a)	Capítulo 3/ Seção 3.1
A study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality	Materials & Design (SANTANA <i>et al.</i> , 2017b)	Capítulo 3/ Seção 3.2
Dimensional Analysis of PLA and PETG Parts Built by Open Source Extrusion-Based 3D Printing	<b>A ser publicado no COBEF 2019</b>	Capítulo 3/ Seção 3.3
Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica	Revista Matéria (Rio de Janeiro) (SANTANA <i>et al.</i> , 2018)	Capítulo 3/ Seção 3.4

O conteúdo desenvolvido nos artigos é de autoria do autor desta tese de doutorado. Ao texto, bem como às Figuras e Tabelas, apresentados em cada uma das seções correspondentes às divulgações são estabelecidos os devidos créditos às plataformas nas quais foram publicados.

The content of the mentioned papers is authored by this PhD thesis' author. Text, Figures and Tables presented in each section are credited to the corresponding publishing platform.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicações das tecnologias de MA (adaptado de WOHLERS, 2018).....	40
Figura 2 – Metodologia experimental da tese. ....	44
Figura 3 - Conexão <i>snap-fit</i> , partes macho e fêmea (adaptado de ROBELLER <i>et al.</i> , 2014)..	45
Figura 4 – Comportamento durante a montagem (adaptado de TROUGHTON, 2008) (a), direções de inserção e retenção (b) (adaptado de SURI, 2002).....	46
Figura 5 – <i>Cantilever snap-fits</i> , variáveis e terminologias (adaptado de BONENBERGER, 2005).....	47
Figura 6 – Força de deflexão e inserção (a) (adaptado de BASF, 2007), módulo secante (adaptado de TROUGHTON, 2008). ....	48
Figura 7 – Conectores <i>snap-fit</i> na indústria automotiva, (a) caixa de fusíveis, (b) vista em detalhe (adaptado de BASF, 2007).....	49
Figura 8 – Categorização dos processos de Manufatura Aditiva (adaptado de BIKAS <i>et al.</i> , 2016).....	50
Figura 9 – Modelo generalizado das etapas dos processos de Manufatura Aditiva (adaptado de CAMPBELL, 2011). ....	51
Figura 10 – Estratégias de deposição para um conector <i>snap-fit</i> de acordo com Ahn <i>et al.</i> (2002), (a) má solução, (b) boa solução (adaptado de KLAN <i>et al.</i> , 2016).....	52
Figura 11 – Orientação da barra <i>cantilever</i> em relação a direção de construção (adaptado de KLAHN <i>et al.</i> , 2016).....	53
Figura 12 – Tampa com conectores <i>snap-fit</i> (adaptado de KLAHN <i>et al.</i> , 2016).....	54
Figura 13 – Encaixe proposto: (a) macho, (b) fêmea, (c) detalhamento e (d) ensaio mecânico (adaptado de TOROSSIAN e BOURELL, 2015).....	55
Figura 14 – Força de montagem ( $F_m$ ) em relação ao ângulo de inserção (a) e força de desmontagem ( $F_d$ ) para o ângulo de separação (b) (adaptado de TOROSSIAN e BOURELL, 2015).....	56
Figura 15 – Forças de montagem ( $F_m$ ) e desmontagem ( $F_d$ ) em relação ao diâmetro interno (adaptado de TOROSSIAN e BOURELL, 2015).....	56
Figura 16 – (a) “Cubo teste” (adaptado de ALLISON <i>et al.</i> , 2017 b <i>apud</i> ALLISON <i>et al.</i> , 2017 a), <i>snap-fit</i> (b) e (c) projeto de sistema de encaixe (folgas) (adaptado de ALLISON <i>et al.</i> , 2017 a) . ....	57
Figura 17 – Montagem <i>snap-fit</i> (a), interferência entre as peças (b) e (c) flexibilidade, peça inferior (adaptado de UDROIU, 2012).....	58

Figura 18 – Teste de montagem (a), peça fabricada com o material <i>DurusWhite</i> (b) (adaptado de UDROIU, 2012). .....	58
Figura 19 – Protótipo fabricado por Seidl <i>et al.</i> (2015) (adaptado de SEIDL <i>et al.</i> , 2015). ....	59
Figura 20 – Tensão vs. tempo de envelhecimento (BARETA <i>et al.</i> , 2011).....	60
Figura 21 – Módulo de elasticidade vs. tempo de envelhecimento (BARETA <i>et al.</i> , 2011) ...	61
Figura 22 – <i>Snap-fit</i> tipo gancho (a), anelar (b) e rotular (c) (adaptado de BARETA <i>et al.</i> , 2011). .....	61
Figura 23 – Espaço liberado no <i>chip</i> (a), montagem da placa com <i>snap-fits</i> (b) e (c) sistema completo (adaptado de ASHOUR e KERSAUDY-KERHOAS, 2017). .....	63
Figura 24 – Caixa de bateria por impressão 3D (a), <i>snap-fit</i> impresso (b) (adaptado de STRATASYS, [2016]). .....	63
Figura 25 – Sistema <i>snap-fit</i> (dimensões em mm) (a) e (b) ensaio de tração (adaptado de CHACÓN <i>et al.</i> , 2017). .....	64
Figura 26 – Diferentes modos de fratura dos machos (adaptado de CHACÓN <i>et al.</i> , 2017). .	65
Figura 27 – Conceito do conector impresso (a), montagem com as garrafas (b) (adaptado de KOVACS <i>et al.</i> , 2017). .....	65
Figura 28 – <i>TrussFab</i> montagens: (a) ponte, (b) cadeiras e mesa, e (c) barco (adaptado de KOVACS <i>et al.</i> , 2017). .....	66
Figura 29 – Princípio do processo FDM da Stratasys (Adaptado de BRYDEN, 2014).....	67
Figura 30 – Regra Y, H e T para suportes (baseado nos conceitos de REDWOOD <i>et al.</i> , 2017). .....	68
Figura 31- RepRap “Darwin”, versão 1 (JONES <i>et al.</i> , 2011).....	71
Figura 32 – Sistema de deposição Fab@home (adaptado de MALONE e LIPSON, 2007) (a), extrusor de pasta de açúcar (FERREIRA e ALVES, 2017) (b).....	72
Figura 33 – Diagrama de Ishikawa para os fatores de influência em impressora 3D <i>open source</i> (adaptado de SANCHEZ <i>et al.</i> , 2014). .....	72
Figura 34 – Representação dos parâmetros de processo FDM (adaptado de KALITA <i>et al.</i> , 2003). .....	73
Figura 35 – Pescoço (a) (adaptado de BÄHR e WESTKÄMPER, 2018) e espessura de camada e qualidade da superfície, (b) 0,3 mm e (c) 0,15 mm (adaptado de EVANS, 2012). .....	74
Figura 36 – Ângulo de varredura (a) (adaptado de WU <i>et al.</i> , 2015), orientações de construção (LEE e HUANG, 2013). .....	75
Figura 37 – Exemplo de diferentes orientações de construção (adaptado de DECICCO, 2013). .....	76

Figura 38 – Representação do número de contornos (adaptado de DOMINGO-ESPIN <i>et al.</i> , 2014).....	76
Figura 39 – Variação do percentual de preenchimento (adaptado de RIVA, 2013). ....	78
Figura 40 – Estratégias de deposição, (a) <i>raster</i> , (b) <i>contour</i> , (c) <i>countor</i> e <i>raster</i> (adaptado de VOLPATO <i>et al.</i> , 2005), camadas alternadas (d) (adaptado de VOLPATO <i>et al.</i> , 2007). ....	79
Figura 41 – Estratégias de deposição, <i>Slic3r</i> (adaptado de ANDERSEN, 2015).....	80
Figura 42 – Fenômenos térmicos (a) (adaptado ARMILLOTTA <i>et al.</i> , 2018) e peça empenada (b) (adaptado de GUERRERO-DE-MIER <i>et al.</i> , 2015). ....	82
Figura 43 – Efeito escada e variação da espessura de camada (adaptado de QUAN <i>et al.</i> , 2015). ....	83
Figura 44 – Anisotropia, efeitos da aplicação de uma carga em peças impressas na vertical (a) e horizontal (b) (adaptado de VOLPATO <i>et al.</i> , 2017). ....	84
Figura 45 – Composição de uma peça fabricada por FDM (adaptado de BELLEHUMEUR <i>et al.</i> , 2004 por SANTANA, 2015). ....	85
Figura 46 – Configurações alinhada (a) e desalinhada (b) (adaptado de RODRIGUEZ <i>et al.</i> , 2000).....	85
Figura 47 – Processo de união entre filamentos depositados (adaptado de FITZHARRIS <i>et al.</i> , 2018).....	86
Figura 48 – Gabinete para <i>Mini PC UDOO</i> (a); elementos macho (b) e fêmea (c) da conexão <i>snap-fit</i> (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017a). ....	94
Figura 49 – Representação da folga entre os elementos da conexão <i>snap-fit</i> (a) e ilustração da interação entre bordas nas concepções 1 (b) e 2 (c) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017a). ....	95
Figura 50 – Regiões com necessidade de uso de estruturas de suporte durante a impressão 3D das peças. ....	96
Figura 51 – Metodologia do estudo de caso exploratório (SANTANA <i>et al.</i> , 2017a). ....	96
Figura 52 – Rompimento da união entre camadas (a), e fratura na região de encontro entre bordas (b) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017a). ....	98
Figura 53 – Falhas nos conectores <i>snap-fit</i> : (a) macho e (b) fêmea (SANTANA <i>et al.</i> , 2017a). ....	98
Figura 54 – Levantamento de forma, conectores machos (SANTANA <i>et al.</i> , 2017a).....	100
Figura 55 – Levantamento de forma, conectores fêmeas (SANTANA <i>et al.</i> , 2017a).....	100
Figura 56 – Encaixe entre os elementos macho e fêmea (SANTANA <i>et al.</i> , 2017a).. ....	100
Figura 57 – Excesso de material depositado (SANTANA <i>et al.</i> , 2017a).....	101

Figura 58 – Empenamento: desvios dimensionais (a), modelos sobrepostos (b) (SANTANA <i>et al.</i> , 2017a).....	102
Figura 59 – Montagem do produto: (a) gabinete aberto, (b) gabinete montado (SANTANA <i>et al.</i> , 2017a).....	102
Figura 60 – Parâmetros de processo (a), amostra cúbica (b) e pontos de medição para os três eixos (c) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b). ....	106
Figura 61 – Variação dimensional em função dos fatores e níveis, para as direções X, Y e Z (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b). ....	109
Figura 62 – Acomodação dos filamentos depositados, entre e dentro das camadas (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).....	109
Figura 63 – Comportamento das velocidades (a) preenchimento e (b) perímetros (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b) .....	110
Figura 64 – Massa calculada a partir do Gcode vs. massa média medida (a); relação massa – volume (b) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).....	111
Figura 65 – Desvios dimensionais (a) e sobreposição entre modelos CAD e digitalizado (b), amostra com $P_p=100\%$ ; referência “Topo” (Condição 3) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).....	113
Figura 66 – Desvios dimensionais (a) e sobreposição entre modelos CAD e digitalizado (b), amostra com $P_p=100\%$ ; referência “Base” (Condição 3) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).....	113
Figura 67 – Desvios dimensionais (a), sobreposição entre modelos CAD e digitalizado (b), amostra com $P_p=20\%$ (Condição 1) e (c) transição entre trajetórias (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).....	114
Figura 68 – Análise de regressão linear para o eixo Z: gráfico de dispersão (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).....	115
Figura 69 – Massa e volume médio em relação aos parâmetros significativos e seus níveis (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b). ....	116
Figura 70 – Variação dimensional por direção em função de $M_e$ e níveis (a) e (b) gráfico de dispersão para direção X (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).....	118
Figura 71 – Escaneamento 3D para amostra com $M_e$ igual a 0,5: (a) desvios dimensionais e (b) sobreposição de modelos (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b). ....	119
Figura 72 – Filamentos finos e ausência de adesão entre os mesmos (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).....	120

Figura 73 – Escaneamento 3D e desvios dimensionais: (a) amostra com $Me=0,9$ e (b) $Me=1$ (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).	121
Figura 74 – Aspecto das superfícies, (a) peça em escala aumentada e (b) amostra experimental (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).	121
Figura 75 – Massa calculada a partir do Gcode versus a massa média medida (a), e relação massa volume (b); estudo parte 2 (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).	122
Figura 76 – Variação das respostas em relação aos parâmetros significativos e níveis: (a) massa e (b) volume (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).	124
Figura 77 – Procedimento metodológico para o processo de calibração (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).	126
Figura 78 – Parâmetros do processo (a) e (b) geometria da amostra.	130
Figura 79 – Valores dimensionais médios por fatores e níveis, dimensões de 25 mm (a) e 15 mm (b).	132
Figura 80 – Massa medida versus massa calculada a partir do Gcode (a), e excesso de material (PLA n) (b).	133
Figura 81 – Estado filamentar (a), peças injetadas (b), e amostras impressas (c) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	136
Figura 82 – Metodologia de análise (SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	137
Figura 83 – Representação dos parâmetros de processo avaliados: (a) $\hat{A}_v$ e $E_d$ , e (b) $O_c$ (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	139
Figura 84 – Processo de moagem (a), filamentos moídos (b) e (c) peças injetadas em PLA azul e PETG (SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	140
Figura 85 – Resultados da análise de TGA com os filamentos de PLA (a) e PETG (b) (SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	141
Figura 86 – Curvas da análise de DSC, PLA (a) e PETG (b) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	143
Figura 87 – Curvas da análise de FTIR, (a) PLA e (b) PETG (SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	144
Figura 88 – Média da tensão máxima (a) e do módulo de <i>Young</i> (b) por condições e materiais (SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	149
Figura 89 – Média da deformação na tensão máxima (a) e da massa (b) por condições e materiais (SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	149
Figura 90 – Massa versus tensão máxima e módulo de <i>Young</i> , (a) PLA e (b) PETG (SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	152

Figura 91 – Comparações entre as respostas para as peças injetadas e impressas, (a) tensão máxima e (b) módulo de <i>Young</i> (SANTANA <i>et al.</i> , 2018).....	153
Figura 92 – Curvas de tensão deformação, amostras impressas e injetada: (a) PLA e (b) PETG. ....	154
Figura 93 – Comportamento do atrito em um bloco (adaptado de YOUNG e FREEDMAN, 2009; CORRADI <i>et al.</i> , 2010).....	157
Figura 94 – Conceito do plano inclinado.....	158
Figura 95 – Orientação de construção da “superfície de interação” (a) e (b) texturas. ....	159
Figura 96 – Rotação do “Bloco Padrão” (cubo) e as diferentes texturas: (a) 45°, (b) 90° e (c) 0°. ....	159
Figura 97 – Cubo durante o processo de impressão (a), planos XZ e YZ (b), faces lateral e topo (c).....	160
Figura 98 – Aparato para a medição do coeficiente de atrito estático.....	161
Figura 99 – Massa extra adicionada ao “bloco padrão”. ....	161
Figura 100 – Medição da rugosidade: (a) cubo e (b) superfície de interação. ....	162
Figura 101 – Direção de medição da rugosidade ( $R_a$ ). ....	162
Figura 102 – Mapa de cores para a relação entre os níveis de $\hat{A}_s$ “Sup. interação” e $\hat{A}_s$ “Bloco padrão”, (a) PLA e (b) PETG. ....	165
Figura 103 – Comparação entre PLA e PETG para os valores de $\mu_e$ : (a) baixo, (b) intermediário e (c) alto. ....	166
Figura 104 – Médias da rugosidade ( $R_a$ ) em função de $\hat{A}_v$ e seus níveis: (a) “superfície de interação” e (b) “bloco padrão”. ....	168
Figura 105 – Efeitos da direção de medição nos resultados da rugosidade: (a) $\hat{A}_v = 90^\circ$ e (b) $\hat{A}_v = 0^\circ$ .....	169
Figura 106 – Relação entre as rugosidades das superfícies em contato e o valor de $\mu_e$ , PLA. ....	171
Figura 107 – Relação entre as rugosidades das superfícies em contato e o valor de $\mu_e$ , PETG. ....	171
Figura 108 – Encaixe e movimento entre superfícies com filamentos em 90°.....	172
Figura 109 – Encaixe e movimento entre superfícies com filamentos em 0°.....	173
Figura 110 – Interação 0° 90°, (a) contato e (b) deslizamento.....	174
Figura 111 – Módulo de teste (a), montagem na máquina de ensaios (b) e teste de montagem (c).....	177



Figura 112 – Dimensões dos elementos macho (a) e módulo de teste (fêmea) (b) e folgas para o encaixe (c).....	178
Figura 113 – Representação dos parâmetros de processo: (a) orientação de construção e (b) estratégia concêntrica. ....	178
Figura 114 – Diagrama de forças (a) e disposição dos filamentos depositados em relação às cargas na inserção (b). ....	179
Figura 115 – Etapas do “teste de montagem completa” (a) e “teste de quase montagem” (b). ....	181
Figura 116 – Regiões analisadas no MEV: (a) externas e (b) internas.....	182
Figura 117 – Força de inserção ao longo dos ciclos de montagem, (a) PLA e (b) PETG, e distribuição da força por número de ciclos, (c) PLA e (d) PETG. ....	183
Figura 118 – Teste de quase montagem, (a) PLA e (b) PETG.....	185
Figura 119 – Análise da superfície externa das peças em PLA (MC) (a) e PETG (MC) (b). ....	187
Figura 120 – Falhas na linha de adesão (a) e no corpo dos filamentos depositados (b), amostra em PETG (MC). ....	188
Figura 121 – Estrias nos filamentos na zona do encastramento, amostra PLA (MC).....	188
Figura 122 – Representação dos vazios e seus volumes, peças em PLA. ....	189
Figura 123 – Representação dos vazios e seus volumes, peças em PETG.....	189
Figura 124 – Vazios de maior diâmetro: (a) PLA e (b) PETG.....	191
Figura 125 – Falhas de deposição/acomodação dos filamentos: (a) PLA (QM) e (b) PETG (MC). ....	191
Figura 126 – Representação das falhas geradas por esforços mecânicos (a) e deposição/acomodação dos filamentos (b). ....	194
Figura 127 – Falhas geradas por esforços mecânicos: (a) PETG MC, (b) PETG QM e (c) PLA MC.....	195
Figura 128 – Trajetórias de construção: sequência de deposições. ....	196
Figura 129 – Formação da linha crítica (Gcode) (a), diagrama de posição das linhas de adesão (b), detalhe das trajetórias (c). ....	197
Figura 130 – Formação da estricção: (a) PETG (MC), (b) PLA (MC) e (c) PLA (QC). ....	197
Figura 131 – Estricção, amostra em PETG (MC). ....	198
Figura 132 – Vazios em torno da zona crítica, amostra em PLA (MC).....	199
Figura 133 – Vazios ao longo das camadas, macho PETG (MC). ....	200
Figura 134 – Formação do desprendimento entre filamentos (a) e fratura na linha de união (b). ....	201

Figura 135 – Representação da deformação das barras (a) e análise de forma (b) 2D e (c) 3D, PLA (MC).....	202
Figura 136 – Análise de forma, (a) 2D e (b) 3D, amostra PETG (QM).....	202
Figura 137 – Deformação/desgaste nos filamentos, presilha do macho em PETG.....	203
Figura 138 – Dimensões da fêmea impressa (a) e folgas (b). ....	206
Figura 139 – Planejamento da construção das amostras. ....	206
Figura 140 – Orientação de construção (a) e estratégia de deposição concêntrica (b).....	208
Figura 141 – Disposição dos filamentos em relação às cargas, configuração (1) (a) e 2 (b). ....	208
Figura 142 – Superfície interna da parte fêmea (a), contato/deslizamento com o macho nas configurações 1(b) e 2 (c).....	209
Figura 143 – Ensaio de medição da força de inserção, amostras em PLA (a) e PETG (b)....	210
Figura 144 – Dinâmica do ensaio de DMA.....	211
Figura 145 – Conexões <i>snap-fit</i> em SLS (a) e <i>PolyJet</i> <sup>®</sup> (b). ....	211
Figura 146 – Representação prática dos módulos de armazenamento (E') e perda (E''). ....	214
Figura 147 – Comportamento de E', E'' e tan( $\delta$ ) ao longo do tempo, amostra em PLA configuração (1).....	215
Figura 148 – Comportamento de E', E'' e tan( $\delta$ ) ao longo do tempo, amostra em PETG configuração (1).....	215
Figura 149 – Amostra em PLA fraturadas (a), direção da fratura (b), seção transversal (c) e amostras em PETG (d). ....	217
Figura 150 – Comparação entre os valores de tan ( $\delta$ ) do PLA e do PETG impressos com outros materiais da plataforma <i>CES Edupack 2018</i> <sup>®</sup> (CES,2018). ....	219
Figura 151 – Materiais utilizados para <i>snap-fits</i> (CES,2018) versus PLA e PETG impressos. ....	220
Figura 152 – Comportamento de E', E'' e tan( $\delta$ ) ao longo do tempo, amostra em PLA configuração (2).....	221
Figura 153 – Comportamento de E', E'' e tan( $\delta$ ) ao longo do tempo, amostra em PETG configuração (2).....	222
Figura 154 – Materiais com valores de tan( $\delta$ ) (CES,2018) próximos aos dos polímeros impressos com a configuração (2).....	223
Figura 155 – Fratura amostra vertical em PLA, (a) topo e (b) secção transversal. ....	223
Figura 156 – Relaxamento das tensões das amostras fabricadas com as configurações (1) (a) e (2) (b).....	224

Figura 157 – Efeitos do atrito no processo de montagem dos <i>snap-fits</i> em diferentes superfícies, (a) PLA e (b) PETG.....	227
Figura 158 – Efeito <i>stick-slip</i> (adaptado de PERSSON, 2000; PATEK e BAIIO, 2007; GUSTAFSSON,2013). .....	228
Figura 159 – Força de inserção em dez ciclos de montagem, (a) PLA e (b) PETG, configuração (1). .....	229
Figura 160 – Força de inserção versus deslocamento, amostras em PLA (a) e PETG (b) na configuração (2).....	232
Figura 161 – Fratura nos machos impressos na vertical, (a) PLA e (b) PETG. ....	232
Figura 162 – Movimentação e variação de forma das peças impressas na vertical. ....	233
Figura 163 – Fratura padrão (a) e posição da estrutura de suporte (b). ....	234
Figura 164 – Força de inserção em dez ciclos, (a) SLS e (b) <i>PolyJet</i> <sup>®</sup> .....	235
Figura 165 – Média da redução percentual da força de inserção por tecnologia de impressão. ....	236
Figura 166 – Força de inserção versus o total de ciclos em que esteve constante, (a) SLS e (b) PETG. ....	237
Figura 167 – Força de inserção versus o total de ciclos em que esteve constante, (a) <i>PolyJet</i> <sup>®</sup> e (b) PLA.....	238
Figura 168 – Análise dos vazios: PLA macho, teste MC.....	277
Figura 169 – Análise dos vazios: PLA macho, teste QM.....	278
Figura 170 – Análise dos vazios: PETG macho, teste MC. ....	278
Figura 171 – Análise dos vazios: PETG macho, teste QM. ....	279
Figura 172 – Linha de pensamento: desenvolvimento da relação de reconhecimento usuário sistema de impressão. ....	281



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros geométricos e respectivos valores (adaptado de TOROSSIAN e BOURELL, 2015). .....	55
Tabela 2 – Propriedades da resina <i>FullCure 720</i> obtidas com 90 dias (BARETA <i>et al.</i> , 2011) .....	60
Tabela 3 – Força de montagem para os diferentes engates (adaptado de BARETA <i>et al.</i> , 2011). .....	62
Tabela 4 – Propriedades do FDM Nylon 12, <i>CONDITIONED</i> e <i>UNCONDITIONED (DRY)</i> (adaptado de STRATASYS, 2013). .....	64
Tabela 5 – Propriedades do PLA de acordo com a literatura. ....	90
Tabela 6 – Propriedades do PETG 6763 da EASTMAN® (EASTMAN, 2016). ....	91
Tabela 7 – Resultados da análise dimensional para os elementos relacionados à montagem do gabinete (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017a). ....	97
Tabela 8 – ANOVA ( $\alpha = 95\%$ ) para os elementos dimensionais da base (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017a). ....	99
Tabela 9 – ANOVA ( $\alpha = 95\%$ ) para os elementos dimensionais da tampa (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017a). ....	99
Tabela 10 – Desvios dimensionais na concepção 2: análise por escaneamento 3D (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017a). ....	101
Tabela 11 – Fatores e níveis para as etapas experimentais 1 e 2, e parâmetros fixos (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b). ....	104
Tabela 12 – Arranjo ortogonal L8 de Taguchi e delineamento experimental fatorial completo (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b). ....	105
Tabela 13 – Resultados da análise dimensional por condições experimentais (L8 de Taguchi) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b). ....	107
Tabela 14 – Análises estatísticas para as variações dimensionais da etapa 1 (L8 de Taguchi) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b). ....	107
Tabela 15 – Valores de massa e volume das peças (Taguchi L8) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b). ....	112
Tabela 16 – Análise de variância ( $\alpha=95\%$ ) para massa (g) e volume (mm <sup>3</sup> ) (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b). ....	116
Tabela 17 – Resultados da análise dimensional das peças produzidas na segunda etapa experimental (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b). ....	117

Tabela 18 – Análises estatísticas para as respostas avaliadas na segunda etapa experimental (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).	117
Tabela 19 – Massa e volume medidos, amostras do segundo experimento (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2017b).	122
Tabela 20 – Fatores e níveis avaliados, e parâmetros fixos.	129
Tabela 21 – Planejamento experimental L9 de Taguchi, estudo das geometrias vazadas.	130
Tabela 22 – Resultados das medições externas e internas.	131
Tabela 23 – Condições e equipamentos dos ensaios térmicos e químico (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	138
Tabela 24 – Condições experimentais e parâmetros fixos (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	139
Tabela 25 – Resultados da análise de DSC com PLA e PETG em diferentes estados (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	143
Tabela 26 – Resultados da análise de FTIR por regiões delimitadas nas curvas (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	145
Tabela 27 – Resultados dos ensaios de tração com as amostras injetadas em PLA e PETG (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	147
Tabela 28 – Resultados obtidos nos ensaios de tração, e medição da massa das amostras impressas (adaptado de SANTANA <i>et al.</i> , 2018).	148
Tabela 29 – Condições para medição do coeficiente de atrito estático.	160
Tabela 30 – Massa dos elementos relacionados ao “bloco padrão”.	162
Tabela 31 – Coeficiente de atrito estático médio para as diferentes condições de interação.	163
Tabela 32 – Análise de variância ( $\alpha= 95\%$ ) para o coeficiente de atrito estático ( $\mu_e$ ).	163
Tabela 33 – Teste de <i>Scott-Knott</i> para as interações, PLA.	164
Tabela 34 – Teste de <i>Scott-Knott</i> para as interações, PETG.	164
Tabela 35 – Resultados da medição da rugosidade das peças em PLA e PETG.	167
Tabela 36 – Análise de variância ( $\alpha= 95\%$ ) para a rugosidade, PLA e PETG.	167
Tabela 37 – Razão entre rugosidades para o PLA e PETG.	170
Tabela 38 – Parâmetros de impressão e seus ajustes.	179
Tabela 39 – Valores médios da força de inserção por ciclos de montagem, PLA e PETG.	182
Tabela 40 – Resultados da análise dimensional das peças em PLA e PETG analisadas por TC.	203
Tabela 41 – Valores teóricos da força de inserção para componentes impressos e injetados.	210

Tabela 42 – Resultados da análise de DMA com amostras obtidas nas configurações (1) e (2). .....	213
Tabela 43 – Força de inserção média por ciclos para as conexões <i>snap-fit</i> em PLA e PETG. .....	225
Tabela 44 – Teste de comparação de médias para força de inserção. ....	225
Tabela 45 – Comparação das médias da queda percentual da força de inserção entre PETG e PLA.....	230
Tabela 46 – Comparação das médias da queda percentual da força de inserção entre condições de ensaio. ....	230
Tabela 47 – Comparação entre a redução percentual da força de inserção em todas as tecnologias (ANOVA). ....	236
Tabela 48 – Análise de variância (ANOVA, $\alpha=95\%$ ) dimensões externas e internas. ....	273
Tabela 49 – Análise de Tukey ( $\alpha=95\%$ ) dimensões externas e internas. ....	273
Tabela 50 – Análise de variância (ANOVA, $\alpha=95\%$ ) estudo de caracterização dos materiais. .....	274
Tabela 51 – Teste Tukey estudo de caracterização dos materiais. ....	274
Tabela 52 – Teste de comparação de médias para PLA 0° 90° e PETG 45° 0°.....	275
Tabela 53 – Teste de comparação de médias para PLA 0° 90° e PETG 0° 0°.....	275
Tabela 54 – Teste de comparação de médias para PLA 0° 90° e PETG 0° 90°.....	275
Tabela 55 – Teste de comparação de médias para PLA 45° 45° e PETG 45° 45°.....	275
Tabela 56 – Teste de comparação de médias para PLA 90° 90° e PETG 90° 90°.....	276
Tabela 57 – Teste de comparação de médias para PLA 90° 90° e PETG 90° 45°.....	276
Tabela 58 – Teste de comparação de médias para as rugosidades, PLA.....	276
Tabela 59 – Teste de comparação de médias para as rugosidades, PETG. ....	276





## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Equações de projeto.....	47
Quadro 2 – Vantagens e desvantagens das tecnologias de Manufatura Aditiva (adaptado de WELLER <i>et al.</i> , 2015; VOLPATO <i>et al.</i> , 2017).....	51
Quadro 3 – Resumo das principais vantagens e desvantagens do processo FDM, de acordo com a literatura (ALVES <i>et al.</i> , 2001; CHUA <i>et al.</i> , 2003; LIOU, 2008; KAMRANI e NASR, 2010; GEBHARDT, 2011; BRYDEN, 2014; VOLPATO <i>et al.</i> , 2017).....	69
Quadro 4 – Parâmetros de processo avaliados em estudos sobre propriedades mecânicas. ...	86
Quadro 5 – Propriedades desejáveis em materiais para <i>snap-fits</i> (adaptado de LEE, 2009; TROUGHTON, 2008; TRES, 2014). ....	88
Quadro 6 – Especificações dos processos SLS e <i>PolyJet</i> <sup>®</sup> utilizados. ....	212



## LISTA DE ACRÓNIMOS

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AFFs		Agentes Formadores de camadas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>	Instituto Americano de Ferro e Aço
ASA	<i>Acrylonitrile Styrene Acrylate</i>	Acrilonitrila Estireno Acrilato
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>	Sociedade Americana para Ensaios de Materiais
BIS	<i>Beam interference solidification</i>	
BPM	<i>Ballistic particle manufacturing</i>	
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>	Desenho assistido por Computador
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>	Manufatura assistida por Computador
CBU		Comprimento base <i>UDDO</i>
CNC		Comando Numérico Computadorizado
CTU		Comprimento tampa <i>UDDO</i>
DFA	<i>Design for Assembly</i>	Projeto para montagem
DMA	<i>Dynamic mechanical analysis</i>	Análise dinâmico - mecânica
DMD	<i>Direct metal deposition</i>	Deposição direta de metal
DMLS	<i>Direct metal laser sintering</i>	Sinterização direta de metal a laser
DOE	<i>Design of experiments</i>	Delineamento experimental
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>	Calorimetria Diferencial de Varredura
EBM	<i>Electron beam manufacturing</i>	Fusão por feixe de elétrons
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>	Modelagem por Fusão e Deposição
EBBU		Espessura de borda base <i>UDDO</i>
ETFE	<i>Ethylene Tetrafluoroethylene</i>	Etileno-tetrafluoroetileno
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>	Fabricação por Filamento Fundido
FOSS	<i>Free and Open Source Software</i>	<i>Software</i> livre e de código aberto
FOSH	<i>Free and Open Source Hardware</i>	<i>Hardware</i> livre e de código aberto
FPE	<i>Flexible Polyester</i>	Poliéster flexível
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
GNU	<i>General Public License</i>	
hBU		Altura base <i>UDDO</i>
HIPS	<i>High impact polystyrene</i>	Poliestireno de alto impacto
HIS	<i>Holographic interference solidification</i>	
hTU		Altura tampa <i>UDDO</i>

IJP	<i>Inkjet printing</i>	
LENS	<i>Laser engineered net shaping</i>	
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>	Manufatura Laminar de Objetos
LPD	<i>Laser powder deposition</i>	
LBU		Largura base <i>UDDO</i>
LTP	<i>Liquid thermal polymerization</i>	
LTU		Largura tampa <i>UDDO</i>
MA		Manufatura Aditiva
MC		Montagem Completa
MEV		Microscopia Eletrônica de Varredura
MJM	<i>Multijet modelling</i>	
OS	<i>Open source</i>	Código aberto
PC	<i>Polycarbonate</i>	Policarbonato
PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i>	Politereftalato de etileno
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol- modified</i>	Politereftalato de Etileno Glicol
PEEK	<i>Polyether ether ketone</i>	Poli éter cetona
PLA	<i>Polylactic Acid</i>	Poli Ácido Láctico
POM	<i>Polyoxymethylene</i>	Polioximetileno
PP	<i>Polypropylene</i>	Polipropileno
PPSF	<i>Polyphenylsulfone</i>	Polifenilsulfona
PR		Prototipagem Rápida
PVA	<i>Polyvinyl alcohol</i>	Poli vinil álcool
QM		Quase Montagem
RepRap	<i>Replicating Rapid – prototyper</i>	Prototipagem Rápida Replicável
SFP	<i>Solid foil polymerization</i>	
SGC	<i>Solid ground curing (SGC)</i>	
SLA	<i>Stereolithography Apparatus</i>	Estereolitografia
SLC	<i>Selective laser cladding</i>	
SLM	<i>Selective laser melting</i>	
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>	Sinterização Seletiva a Laser
TC		Tomografia Computadorizada
TGA	<i>Thermogravimetric Analysis</i>	Análise Termogravimétrica
TPE	<i>Thermoplastic Elastomer</i>	Elastômero Termoplástico
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i>	Poliuretano Termoplástico
u.a		Unidades adimensionais
UV		Ultravioleta

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Ângulo da face de inserção e confiabilidade estatística
$\beta$	Ângulo da face de retenção
$\varepsilon$	Deformação máxima do material
$\sigma$	Tensão
$E$	Módulo de <i>Young</i>
$E_p$	Erro padrão
$h_f$	Altura conector fêmea
$L_r$	Comprimento da região de retenção
$L_b$	Comprimento da barra
$L_t$	Comprimento total
$L_t$	Comprimento total
$P$	Força de deflexão
$R_w$	Raio da barra na intersecção com o suporte
$SE$	<i>Standard error</i>
$T_b$	Espessura da barra
$T_c$	Temperatura de cristalização
$T_d$	Temperatura de degradação
$T_g$	Temperatura de transição vítrea
$T_m$	Temperatura de fusão
$T_r$	Espessura da barra na região de retenção
$T_w$	Espessura do suporte da barra
$W$	Força de acoplamento (inserção)
$W_b$	Largura da barra
$W_r$	Largura da barra na região de retenção
$W_f$	Largura conector fêmea
$X_c$	Grau de cristalinidade
$y$	Deflexão admissível
$Y$	Profundidade do rebaixo



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>39</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>39</b>
1.1 OBJETIVOS.....	42
1.1.1 Objetivo geral .....	42
1.1.2 Objetivos específicos.....	42
1.2 APRESENTAÇÃO DA TESE .....	43
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>45</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>45</b>
2.1 <i>SNAP – FIT</i> : CONCEITO .....	45
2.2 MANUFATURA ADITIVA .....	49
2.3 <i>SNAP-FIT</i> E A MANUFATURA ADITIVA .....	52
2.4 MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO .....	66
2.4.1 Manufatura Aditiva por extrusão e o cenário <i>open source</i> .....	69
2.4.2 Parâmetros de processo FDM/FFF .....	72
2.4.3 Aspectos de qualidade das peças produzidas por FDM.....	80
2.4.3.1 Dimensional.....	80
2.4.3.2 Acabamento das superfícies geradas .....	82
2.4.3.3 Comportamento mecânico.....	83
2.5 MATERIAIS .....	87
2.5.1 Materiais: <i>snap-fits</i> .....	87
2.5.2 Filamentos FDM .....	89
2.5.2.1 Polí Ácido Láctico (PLA) .....	89
2.5.2.2 Politereftalato de Etileno Glicol (PETG) .....	90
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS: LITERATURA.....	92
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>93</b>
<b>ESTUDOS PRELIMINARES .....</b>	<b>93</b>
3.1 ESTUDO DE CASO EXPLORATÓRIO: “ <i>UDOO CASE</i> ” .....	93
3.1.1 Materiais e métodos.....	93
3.1.2 Resultados e discussões .....	96
3.1.2.1 Concepção 1 .....	96
3.1.2.2 Concepção 2 .....	99
3.1.3 Conclusões sobre o caso exploratório .....	102

3.2 ESTUDO DE CALIBRAÇÃO PARAMÉTRICA .....	103
<b>3.2.1 Materiais e métodos.....</b>	<b>104</b>
<b>3.2.2 Resultados e discussões .....</b>	<b>106</b>
3.2.2.1 Etapa 1 .....	106
3.2.2.2 Etapa 2 .....	117
<b>3.2.3 Metodologia para calibração paramétrica.....</b>	<b>124</b>
<b>3.2.4 Conclusões sobre a calibração paramétrica.....</b>	<b>126</b>
3.3 ANÁLISE DIMENSIONAL EM GEOMETRIAS VAZADAS .....	129
<b>3.3.1 Materiais e métodos.....</b>	<b>129</b>
<b>3.3.2 Resultados e discussões .....</b>	<b>131</b>
<b>3.3.3 Conclusões sobre a análise dimensional em geometrias vazadas.....</b>	<b>134</b>
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	136
<b>3.4.1 Materiais e métodos.....</b>	<b>136</b>
3.4.1.1 Grupo 1: análises térmicas e químicas .....	137
3.4.1.2 Grupo 2: análises mecânicas .....	138
<b>3.4.2 Resultados e discussões .....</b>	<b>141</b>
3.4.2.1 Grupo 1: análises térmicas e química.....	141
3.4.2.2 Grupo 2: análise mecânicas .....	146
<b>3.4.3 Conclusão sobre a caracterização dos materiais .....</b>	<b>155</b>
3.5 ANÁLISE DE SUPERFÍCIES IMPRESSAS .....	156
<b>3.5.1 Conceitos sobre o atrito .....</b>	<b>156</b>
<b>3.5.2 Procedimentos metodológicos .....</b>	<b>158</b>
<b>3.5.3 Resultados e discussões .....</b>	<b>163</b>
<b>3.5.4 Conclusão sobre a análise das superfícies impressas .....</b>	<b>174</b>
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>177</b>
<b>ANÁLISE DAS CONEXÕES <i>SNAP-FIT</i>.....</b>	<b>177</b>
4.1 PARTE 1: MÓDULO DE BAIXO COEF. ATRITO .....	177
<b>4.1.1 Resultados e discussões .....</b>	<b>182</b>
4.1.1.1 Medição da força de inserção .....	182
4.1.1.2 Tomografia computadorizada (TC).....	188
<b>4.1.2 Conclusões sobre o estudo dos <i>snap-fits</i> impressos (Parte 1).....</b>	<b>204</b>
4.2 PARTE 2: INTERAÇÃO ENTRE PEÇAS IMPRESSAS .....	205
<b>4.2.1 Resultados e discussões .....</b>	<b>212</b>
4.2.1.1 Estudo de caso 1 .....	212



4.2.1.2 Estudo de caso 2 .....	235
<b>4.2.2 Conclusões sobre o estudo dos <i>snap-fits</i> impressos (Parte 2).....</b>	<b>239</b>
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>241</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>241</b>
5.1 CONCLUSÃO.....	241
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	246
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>247</b>
<b>LITERATURA COMPLEMENTAR .....</b>	<b>271</b>
<b>APÊNDICE A:TESTES ESTATÍSTICOS.....</b>	<b>273</b>
<b>APÊNDICE B: ANÁLISE DOS VAZIOS.....</b>	<b>277</b>
<b>APÊNDICE C: RELAÇÃO DE RECONHECIMENTO.....</b>	<b>281</b>



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

No final da década de 1980, surgiu um novo processo baseado na adição de material em camadas planas; era o princípio da manufatura aditiva de camadas. Inicialmente o método tinha como aplicação a fabricação rápida de peças, com o intuito de permitir a visualização de ideias (protótipos), com pouca exigência em relação a resistência e precisão, sendo denominado Prototipagem Rápida (PR) (VOLPATO *et al.*, 2007).

No entanto, de acordo com Gibson *et al.* (2015), os avanços nas aplicações das tecnologias de PR fizeram com que os usuários passassem a questionar o uso da terminologia, considerando-a inadequada em função das novas tendências. Em outras palavras, segundo os autores, o ganho de qualidade dos produtos manufaturados pelas máquinas permitiu a fabricação de peças finais, e não somente de protótipos. Além disso, Campbell *et al.* (2012) destacam o fato de que não há no termo “Prototipagem Rápida” algo que faça alusão ao princípio de funcionamento da tecnologia, baseado na construção em camadas.

A fim de padronizar um termo para a descrição dessas tecnologias, a norma ASTM F2792 (2010) definiu o uso de Manufatura Aditiva (MA) para referenciar processos nos quais objetos são construídos pela união de materiais a partir de um modelo 3D, geralmente pelo princípio camada a camada, em oposição aos métodos de fabricação baseados em subtração. No entanto, o termo Manufatura Aditiva é mais utilizado por comunidades técnicas e científicas, sendo Impressão 3D a expressão mais popular utilizada atualmente (LANZOTTI *et al.*, 2015a). Volpato *et al.* (2017) acreditam ainda que esta última terminologia permite transmitir mais claramente o conceito e os princípios dos processos envolvidos neste cenário.

Rayna e Striukova (2016) apresentaram uma síntese da evolução das tecnologias de Manufatura Aditiva, quanto a sua aplicação, em quatro momentos: (i) uso como técnica de prototipagem rápida; (ii) na segunda metade da década de 1990, com uso dos polímeros com resistência ao calor e ligas metálicas, iniciou-se a adoção das tecnologias de MA em ferramental rápido (*Rapid Tooling*); (iii) no final da década de 2000 os processos passaram a ser utilizados na fabricação de peças finais; (iv) o quarto e último estágio de adoção das tecnologias foi a fabricação doméstica, no qual consumidores (ou usuários finais) constroem eles mesmos os produtos desejados em casa.

Atualmente, de acordo com Wohlers (2018), o maior uso das tecnologias de Manufatura Aditiva em companhias é para a fabricação de peças finais, seguido pela aplicação na construção de protótipos para encaixe e montagem, conforme ilustrado no gráfico da Figura 1.

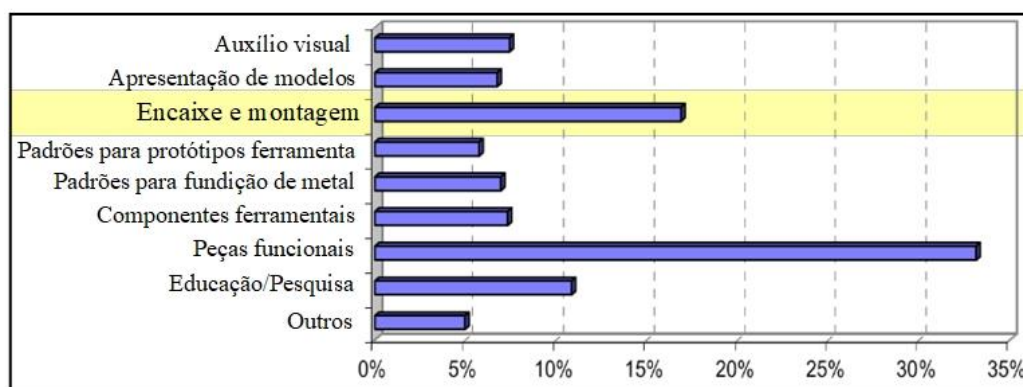


Figura 1 – Aplicações das tecnologias de MA (adaptado de WOHLERS, 2018).

No contexto anteriormente destacado, surge o conceito de projeto para a montagem (*Design for Assembly – DFA*). O DFA se caracteriza como uma das melhores práticas para medir a facilidade com a qual um produto é montado (ULLMAN, 2010). Neste cenário, importantes autores como Ullman (2010) desenvolveram metodologias para melhorar a eficiência do processo e medir a qualidade de projetos a partir da montagem. Em uma de suas diretrizes — “faça o uso mínimo de fixadores separados” (ULLMAN, 2010, p. 335) —, o autor destaca o uso de conexões *snap-fit* como uma solução para a redução do número de fixadores separados e como alternativa para melhorar o desempenho do projeto.

Na indústria automobilística, por exemplo, sob o ponto de vista da montagem, o uso de sistemas *snap-fit* em substituição aos parafusos e outros tipos de juntas mecânicas está crescendo rapidamente (SALMANZADEH e RASOULI, 2015). Ao eliminar o uso de sistemas como parafusos, as conexões rápidas removem também os erros de imprecisão associados aos mesmos e economizam espaço antes utilizados para os furos. A principal vantagem da aplicação de *snap-fits* para a montagem está relacionada à economia de tempo proporcionada pela simplificação do processo. Outros aspectos positivos relacionados a estes tipos de juntas incluem também: isolamento térmico e elétrico, uso de materiais leves e a capacidade de integração (SALMANZADEH e RASOULI, 2015; ASHOUR e KERSAUDY-KERHOAS, 2017; SOUZA *et al.*, 2017).

Embora comumente associados a peças fabricadas em plásticos, os *snap-fits* já existiam muito antes destes. Sistemas do tipo em conexões metal-metal foram, e são, muito populares.

Diversos estilos de grampos em molas de metal são essencialmente *snap-fits* autossuficientes. Os plásticos, no entanto, tornaram os *snap-fits* mais práticos e populares devido a sua flexibilidade relativa. Tecnologias de processamento de plástico, como a moldagem por injeção, viabilizaram a produção de formas complexas de maneira econômica (BONENBERGER, 2005).

No entanto, em função das geometrias dos sistemas *snap-fit*, o molde de injeção utilizado para produzir as peças pode se tornar significativamente complicado e custoso. Sendo assim, as formas dos *snap-fits* são boas candidatas para a fabricação por Manufatura Aditiva (GOENKA, 2011). Iniciativas sobre a utilização de técnicas de MA na produção, projeto e análise deste tipo de conexão são disponibilizadas na literatura. Entretanto, a maior parte dos estudos partiu da utilização de equipamentos e métodos de MA de alto custo (materiais e máquinas), como: sinterização seletiva a laser (SLS) — Klahn *et al.* (2016), Torossian e Bourell (2015) e Allison *et al.* (2017a) —, e *PolyJet*® — Bareta *et al.* (2011), Udriou (2012), Seidl *et al.* (2015), e Ashour e Kersaudy-Kerhoas (2017).

Especialmente no cenário da Impressão 3D por extrusão, trabalhos como o de Chacón *et al.* (2017) avaliaram a resistência à tração de conexões *snap-fit*, entretanto, com o intuito de validar conceitos identificados no objetivo principal do estudo, que foi a análise da influência de parâmetros de processo em peças impressas em Poli(ácido – láctico) (PLA). Já Kovacs *et al.* (2017) utilizaram a técnica de impressão mencionada para produzir um sistema de conexão com o intuito de unir componentes, como garrafas poliméricas em PET, visando a construção de grandes estruturas.

Diante do cenário, observou-se a oportunidade de desenvolvimento de uma investigação dedicada à análise da influência das variáveis do processo de Impressão 3D por extrusão, parâmetros e materiais, em critérios relevantes ao desenvolvimento de conexões *snap-fit*, tais como: dimensional, mecânico e de atrito (contato) entre superfícies impressas. Mais especificamente ao aspecto mecânico, verificou-se a necessidade de uma análise cíclica destes sistemas, para complementar os estudos de Chacón *et al.* (2017) e Kovacs *et al.* (2017).

Ainda como justificativa para o desenvolvimento do trabalho, destaca-se a importância de fortalecer a inserção dos sistemas de Impressão 3D de baixo custo e código aberto (*open source*), baseados em extrusão, na fabricação de peças para a aplicação final. Por fim, Ramli *et al.* (2018) chamam a atenção para o fato de que muitos usuários não estão familiarizados com os parâmetros de processo e os materiais de impressão, o que pode limitar o controle dos equipamentos por parte dos mesmos, evidenciando, portanto, a relevância da elaboração de

estudos baseados em metodologias estruturadas, que utilizem conceitos de fragmentação e simplificação dos problemas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo avaliar as capacidades da Impressão 3D de baixo custo, baseada em extrusão, na confecção de conexões *snap-fit*, através do desenvolvimento de uma relação de reconhecimento usuário-sistema de impressão centrada na análise da influência dos parâmetros de processo e materiais, em critérios de qualidade dimensional, das superfícies e de resistência mecânica.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, têm-se como objetivos específicos:

- a) realizar um mapeamento dos desafios relacionados à impressão de *snap-fits*, através de estudo de caso com modelos funcionais;
- b) analisar os desvios dimensionais e de forma de peças impressas e estabelecer a calibração paramétrica do sistema;
- c) selecionar e caracterizar os materiais poliméricos em função de aspectos de fluidez, térmicos, químicos e mecânicos (estáticos e dinâmicos);
- d) comparar as propriedades mecânicas das peças impressas com as de componentes injetados;
- e) medir a rugosidade das superfícies impressas e o atrito entre partes;
- f) avaliar o comportamento de conexões *snap-fits* impressas com base na medição da força de inserção, em diferentes condições de atrito entre as partes envolvidas;
- g) examinar a estrutura interna e externa dos *snap-fits*, por análise de imagem, visando identificar mecanismos de falhas;
- h) comparar o desempenho de *snap-fits* obtidos por Impressão 3D por extrusão com os elementos fabricados por *PolyJet*<sup>®</sup> e SLS;
- i) estabelecer uma relação de reconhecimento usuário-sistema de impressão.

## 1.2 APRESENTAÇÃO DA TESE

A tese foi estruturada em cinco capítulos:

- a) Capítulo 1: trata-se do presente capítulo, que consistiu nas etapas de contextualização e formulação da questão da tese e determinação dos objetivos do trabalho;
- b) Capítulo 2: estado da arte, no qual foram abordados conceitos gerais sobre os *snap-fits* e suas características técnicas, quanto à Manufatura Aditiva na fabricação desses sistemas de conexão e aspectos específicos da Impressão 3D por extrusão e dos materiais utilizados nesta investigação;
- c) Capítulo 3: apresenta a primeira etapa experimental da pesquisa, a fragmentação do problema da tese em uma série de estudos preliminares: (i) estudo de caso exploratório para mapear os problemas associados à impressão de *snap-fits*; (ii) calibrar os parâmetros de processo, melhorar a qualidade dimensional externa e interna de peças impressas e selecionar materiais de impressão; (iii) caracterizar os polímeros escolhidos para a fabricação dos *snap-fits*, através de análises térmicas, química e mecânica; e (iv) avaliar as condições de atrito e a qualidade das superfícies fabricadas pelo processo de Impressão 3D por extrusão — Figura 2, etapas 1 a 5;
- d) Capítulo 4: após a seleção das melhores configurações paramétricas e dos materiais, no Capítulo 4 foram realizados os estudos específicos à análise de desempenho dos sistemas *snap-fit* impressos diante de ensaios de montagem com diferentes condições de atrito entre as superfícies. A estrutura das peças foi avaliada também por análises de Tomografia e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Caracterizou-se também a resposta dinâmica de peças impressas por análises de DMA — Figura 2, etapas 6 e 7;
- e) Capítulo 5: conclusão e recomendações para trabalhos futuros.

Devido à grande quantidade de experimentos realizados nesta tese, foi adotada uma metodologia para a apresentação dos estudos dos Capítulos 3 e 4 em um formato que reuniu, em cada etapa, uma sequência de tópicos baseada nos materiais e métodos, resultados e discussões e conclusões.

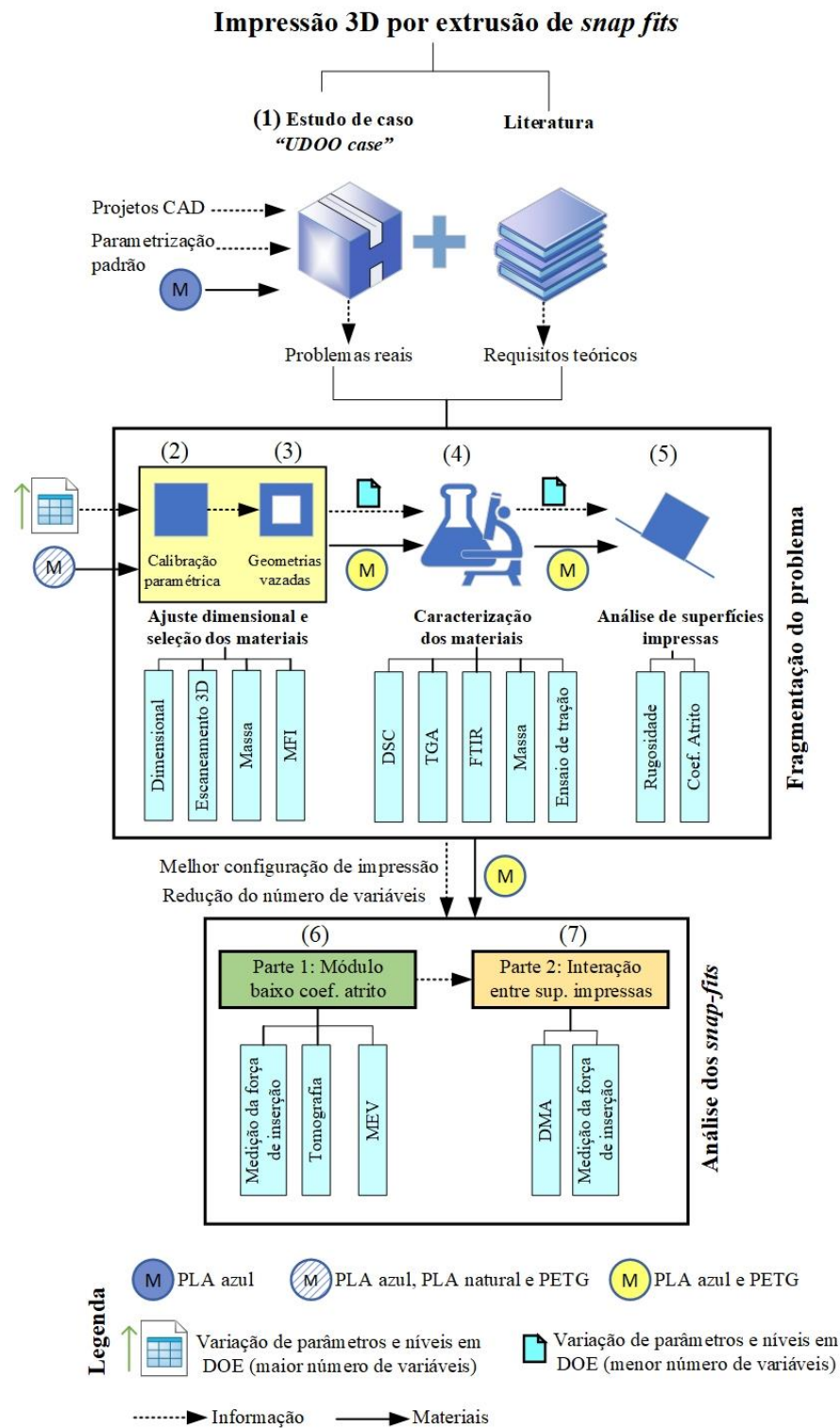


Figura 2 – Metodologia experimental da tese.



## CAPÍTULO 2

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 *SNAP – FIT*: CONCEITO

Os conectores *snap-fit* estão entre os mais econômicos, rápidos e populares métodos de montagem, apresentando um crescente uso devido à tendência de substituição de elementos de fixação separados, com o objetivo de simplificar os processos de fabricação (TROUGHTON, 2008). A união entre os componentes que utilizam este tipo de junta ocorre a partir, e exclusivamente, da elasticidade intrínseca dos materiais (LANDAU *et al.*, 2009). Basicamente este tipo de junta consiste em uma parte “macho” — *cantilever hook* (presilha) — e outra “fêmea”, conforme mostrado na Figura 3 (ROBELLER *et al.*, 2014).

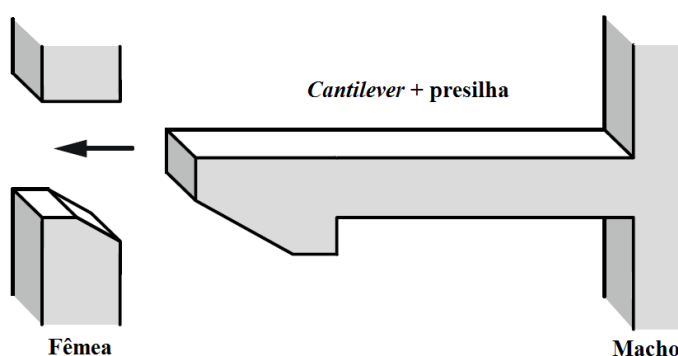


Figura 3 - Conexão *snap-fit*, partes macho e fêmea (adaptado de ROBELLER *et al.*, 2014).

Quando um sistema *snap-fit* é encaixado em uma peça, a interferência da presilha no outro elemento a ser montado cria uma força de acoplamento para defletir o braço de suporte (*cantilever*) e assim unir as duas partes (CHEN e LAN, 2012). A Figura 4 (a) representa toda a ação de encaixe em um sistema *snap-fit*, sendo: (i) a estrutura *cantilever* e a peça de acoplamento antes da montagem; (ii) a deflexão parcial do conjunto barra-presilha no contato inicial; (iii) a deflexão máxima; e (iv) o encaixe da presilha na peça de acoplamento, retornando à posição não defletida (TROUGHTON, 2008).

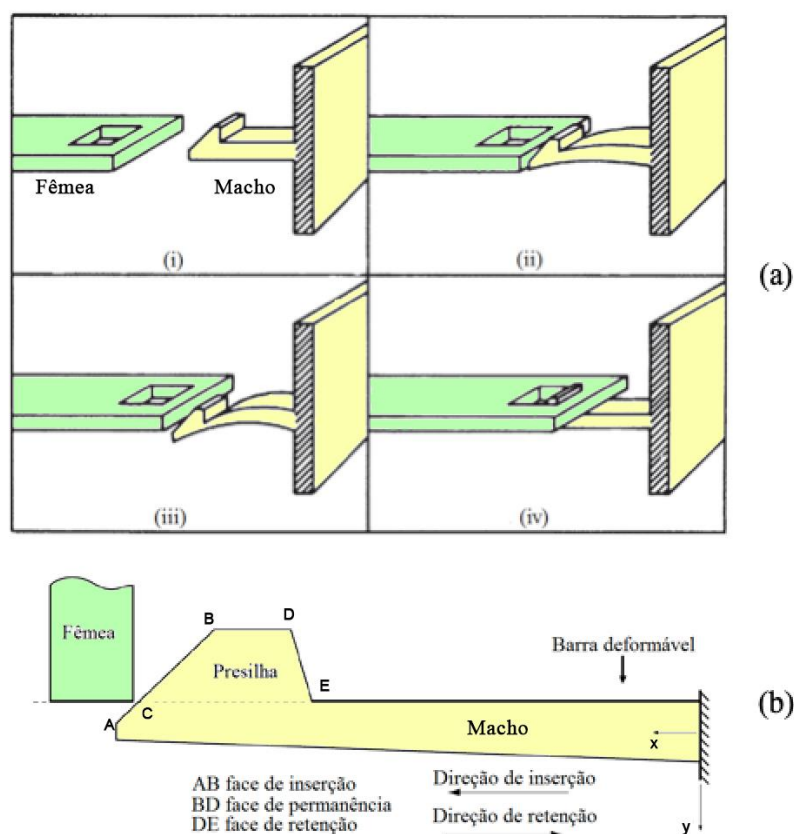


Figura 4 – Comportamento durante a montagem (adaptado de TROUGHTON, 2008) (a), direções de inserção e retenção (b) (adaptado de SURI, 2002).

A força de acoplamento, ou inserção, assim como a força de retenção e a deformação na inserção, são, de acordo com Suri e Lucher (2000), os principais fatores relacionados a critérios de desempenho de sistemas *snap-fit* citados na literatura. Segundo os autores:

- força de inserção caracteriza-se pela força que deve ser aplicada na direção de inserção do *snap-fit* — Figura 4 (b) — para encaixá-lo.
- a força de retenção corresponde à força que deve ser aplicada na direção de separação do sistema *snap* durante a ação de desmontagem. Se o conjunto for projetado para uma montagem permanente, o desprendimento das partes unidas pode ocorrer devido à fratura, deformação permanente, ou pela perda de acoplamento entre os componentes encaixados.
- deformação na inserção (*insertion strain*) caracteriza-se pela deformação gerada no conector durante o processo de inserção. Este critério é o mais utilizado para o dimensionamento deste tipo de juntas — Figura 4 (a), partes (ii) e (iii). A maior parte dos *snap-fits* defletem uma certa distância durante a montagem, determinada pela magnitude do desvio.

O desempenho de um conector *snap-fit* depende diretamente de seu projeto de engenharia (SOLVAY, 2013). No projeto de sistemas *snap-fits*, os parâmetros geométricos das peças são importantes (Figura 5), uma vez que definem a “força” necessária para a montagem e desmontagem e as características separáveis e inseparáveis das juntas (ROBELLER *et al.*, 2014). As principais equações de projeto para sistemas *snap-fits* são apresentadas no Quadro 1 (STAFF, 1997; BAYER, 2000; BONENBERGER, 2005; TICONA, 2006; BASF, 2007; TROUGHTON, 2008; ROBELLER, 2014; TRES, 2014).

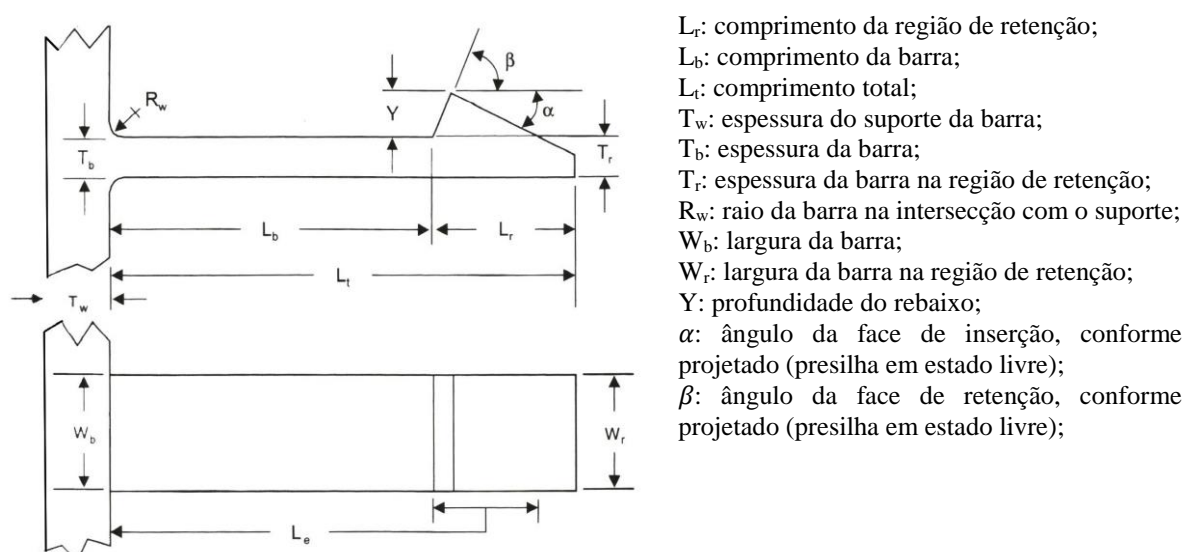


Figura 5 – Cantilever *snap-fits*, variáveis e terminologias (adaptado de BONENBERGER, 2005).

Quadro 1 – Equações de projeto.

Característica	Equação	Descrição
Deflexão admissível (y)	$y = \frac{2 \varepsilon L_b^2}{3 T_b}$ Eq. (1)	$\varepsilon$ : deformação máxima do material
Força de deflexão (P) — Figura 6 (a)	$P = \frac{W_b T_b^2 E_s \varepsilon}{6 L_b}$ Eq. (2)	$E_s$ : módulo secante — Figura 6 (b) <sup>1</sup>
Força de inserção (W) — Figura 6 (a)	$W = P \left[ \frac{\mu + \tan(\alpha)}{1 - \mu \tan(\alpha)} \right]$ Eq. (3)	$\mu$ : coeficiente de atrito

<sup>1</sup> Na Figura 6 (b),  $E_o$  corresponde ao módulo de elasticidade, ou tangente (TROUGHTON, 2008).

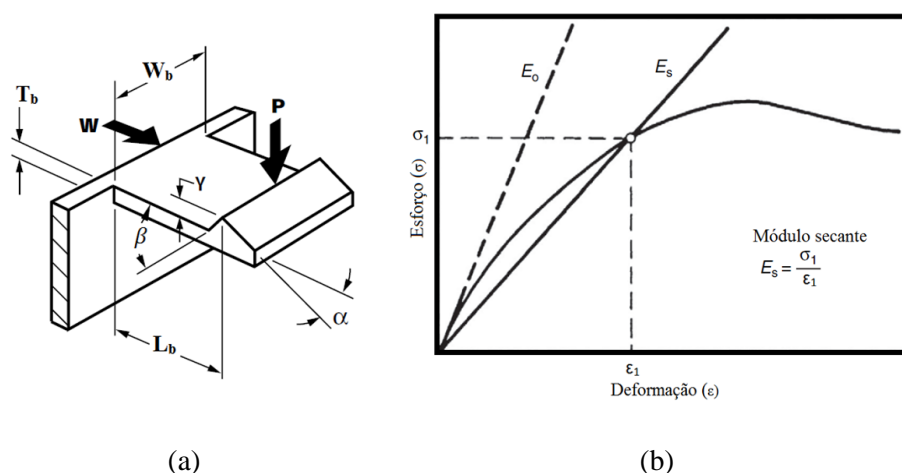


Figura 6 – Força de deflexão e inserção (a) (adaptado de BASF, 2007), módulo secante (adaptado de TROUGHTON, 2008).

Projetos inadequados podem promover a quebra dos elementos durante a montagem, ou na moldagem ou transporte dos mesmos (SOLVAY, 2013). De acordo com Bonenberger (2005) e Landau (2009) os requisitos de projeto em *snap-fits* são: (i) resistir às solicitações durante e após a montagem; (ii) dispor de controle de movimento relativo entre as partes, garantindo uma fixação estável; (iii) harmonia entre os componentes de interface (compatibilidade); e (iv) robustez, isto é, resistir a todas as influências variáveis, durante o processo de desenvolvimento, fabricação e utilização.

*Snap-fits* podem ser utilizados para a união de partes fabricadas com polímeros não similares, ou materiais completamente diferentes como plásticos e metais. Tais sistemas encontram-se aplicados na montagem de ferramentas elétricas, *chassis* de computadores, caixas de embalagens, brinquedos, partes automotivas, dispositivos médicos, entre outros milhares de produtos (TRES, 2014). Exemplos de sistemas com *snap-fits* aplicados à indústria automobilística são apresentados na Figura 7 (a) e (b). Em um aspecto geral e sintetizado, Troughton (2008) apresenta as principais vantagens e desvantagens dos sistemas *snap-fit*:

- não necessitam da introdução de materiais adicionais como adesivos, ou parafusos de fixação, tornando-se assim sistemas de baixo custo e de fácil montagem, conduzindo a taxas de produção mais elevadas (de até 60 partes por minuto) e, em muitos casos, com a necessidade mínima de ferramentas;
- podem ser concebidos como um dispositivo de fixação permanente, muitas vezes inacessíveis pela parte externa da peça, ou para aplicações de montagem e desmontagem;

- c) são vulneráveis a fraturas por fadiga, impossíveis de reparar e, muitas vezes, resultam em falha completa das peças. *Snap-fits*, portanto, funcionam melhor com materiais dúcteis, mas podem ainda sofrer com afrouxamento através de expansão térmica, umidade, e efeitos ambientais.

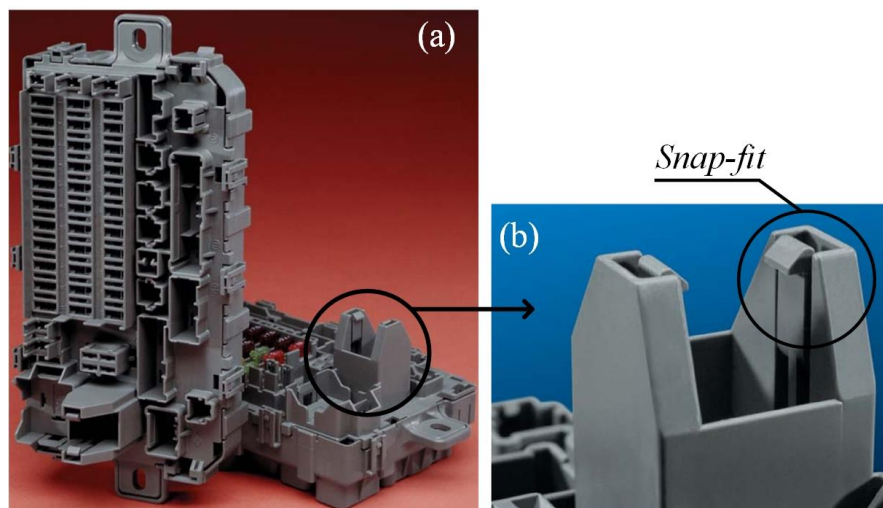


Figura 7 – Conectores *snap-fit* na indústria automotiva, (a) caixa de fusíveis, (b) vista em detalhe (adaptado de BASF, 2007).

## 2.2 MANUFATURA ADITIVA

A concepção de Impressão 3D, ou Manufatura Aditiva, foi iniciada com Charles Hull em 1980, com a fabricação de componentes plásticos a partir de fotopolímeros, com o que ficou conhecido como Estereolitografia — *Stereolithography Apparatus* (SLA). A tecnologia criada por Hull teve seu pedido de patente requerido em 1984 e aprovado em 1986, mesmo ano em que o mesmo fundou a empresa *3D Systems*®. Após a criação do processo SLA, muitos outros sistemas de MA foram desenvolvidos por empresas comerciais e comunidades acadêmicas. Alguns exemplos desses sistemas são: a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) (Universidade do Texas), Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) (*Stratasys*®), Fabricação por Objetos Laminados (LOM) (*Helisys*®), entre outras (HULL, 1986; ALVES *et al.*, 2001; LUO *et al.*, 2002; GROSS *et al.*, 2014; BERCHON e LUYT, 2014; SPIE PROFESSIONAL, 2013; BANDYOPADHYAY e BOSE, 2016; BALLETTI *et al.*, 2017).

De maneira geral, as tecnologias MA podem ser diferenciadas sob quatro aspectos: estado inicial da matéria prima, fonte de energia, método utilizado para a formação das camadas, e as condições nas quais as peças são fabricadas (XU *et al.*, 1999). Os agentes responsáveis pela formação das camadas, classificados como AFFs (Agentes Formadores de Fatias) por Maia *et*

al. (2013), podem, segundo os autores, apresentarem-se como: feixe de energia (laser, elétrons, íons), cabeçote de impressão (jato de tinta ou extrusão polimérica), ou lâminas. Todos os sistemas citados podem estar associados ou não a elementos para espalhamento de pós, régua niveladoras, ou aparadores de camadas. Algumas das principais tecnologias de Manufatura Aditiva e suas particularidades encontram-se disponíveis na Figura 8.

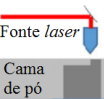
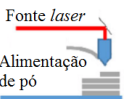
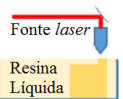
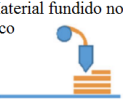
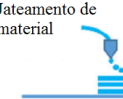
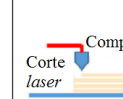
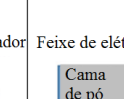




























Processos de Manufatura Aditiva (MA)															
Processos		Processos MA baseados em laser						Extrusão térmica	Jateamento de material	Adesão de material	Feixe de elétrons				
		Fusão a laser		Polimerização a laser											
Esquemático															
Nome Material		SLS		DMD		SLA		FDM		3DP		LOM		EBM	
		SLM		LENS		SGC		Robocasting		IJP		SFP			
		DMLS		SLC		LTP				MJM					
				LPD		BIS				BPM					
						HIS				Thermojet					
Estado do material		Pó		Líquido		Sólido									

Figura 8 – Categorização dos processos de Manufatura Aditiva (adaptado de BIKAS *et al.*, 2016).

Conforme exposto anteriormente, e com base na Figura 8, as tecnologias de Manufatura Aditiva se diferenciam, basicamente, em função do estado do material de construção e de aspectos específicos de cada processo. No entanto, tais tecnologias compartilham das mesmas características em relação ao planejamento das etapas de processo, isto é, do ponto de vista computacional (MARTINS *et al.* 2010). As principais etapas em um processo MA são apresentadas na Figura 9 (CAMPBELL *et al.*, 2011).

Basicamente (Figura 9) o processo de Manufatura Aditiva inicia-se com o modelo 3D do objeto a ser construído, usualmente criado a partir de um *software* CAD (*Computer Aided Design*) ou pela digitalização de um artefato existente. *Softwares* especialistas são utilizados para fatiar o modelo 3D em camadas transversais, gerando um arquivo que será enviado para o equipamento MA. A máquina de MA fabrica então o objeto, ao formar cada camada a partir do posicionamento seletivo do material (CAMPBELL *et al.*, 2011).



Figura 9 – Modelo generalizado das etapas dos processos de Manufatura Aditiva (adaptado de CAMPBELL, 2011).

Cada tecnologia MA tem suas capacidades processuais, vantagens e limitações quanto a: (i) materiais, (ii) volume de construção, (iii) velocidade de processamento, (iv) qualidade das peças (desempenho mecânico, precisão dimensional, qualidade das superfícies geradas) e (v) quantidade de pós-processamentos necessários para melhorar a qualidade das superfícies, propriedades mecânicas, e dimensionais (CONNER *et al.*, 2014). Por fim, Weller *et al.* (2015) e Volpato *et al.* (2017) apontam, em um aspecto geral, as principais vantagens e desvantagens das tecnologias MA, conforme representado no Quadro 2.

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens das tecnologias de Manufatura Aditiva (adaptado de WELLER *et al.*, 2015; VOLPATO *et al.*, 2017).

Vantagens (+)	Desvantagens (-)
Fabricação direta a partir de um modelo digital 3D, sem a necessidade de ferramentas ou moldes;	Soluções de construção limitadas a materiais "imprimíveis" e às dimensões da área de trabalho;
Mudanças no projeto do produto sem aumento de custos de fabricação;	Qualidade das peças: limitação de reprodutibilidade e baixa resistência a influências ambientais;
Permite maior complexidade de projeto, sem aumento de custos;	Grande necessidade de acabamentos nas superfícies;
Grande flexibilidade de fabricação: os objetos podem ser produzidos na ordem escolhida sem custos adicionais;	Falta de ferramentas e diretrizes que direcionem a completa exploração das possibilidades da MA;
Menos matéria prima requerida e menos resíduos gerados;	Baixa velocidade de produção e necessidade de mão de obra qualificada.
Continua	



Quadro 2 – Vantagens e desvantagens das tecnologias de Manufatura Aditiva (Adaptado de WELLER *et al.*, 2015; VOLPATO *et al.* 2017) (Continuação)

Não necessita de sistemas para fixação das peças. Estas são confeccionadas em um único equipamento do início ao fim, isto é, em uma única etapa;	Materiais obtidos por MA tendem a apresentar propriedades diferentes dos materiais obtidos por outros processos;
Não requer trocas de ferramentas durante a fabricação de componentes, como acontece em máquinas CNC;	Erros dimensionais que podem atingir, em especial na direção de construção, valores próximos ao de uma espessura de camada;
Capacidade de produzir peças finais, principalmente em tecnologias que usam metais e polímeros de engenharia;	Tecnologias MA industriais apresentam custos elevados de material, equipamento, operação e insumos;
Dispõe de tecnologias com potencial para misturar materiais, variando assim propriedades ao longo das peças (resistência, dureza, porosidade, flexibilidade, entre outras).	Problemas como empenamento do material se fazem presentes em alguns processos.

### 2.3 SNAP-FIT E A MANUFATURA ADITIVA

Este tópico tem como objetivo mostrar estudos disponíveis na literatura sobre a aplicação de tecnologias de Manufatura Aditiva no contexto dos sistemas *snap-fit*. Para iniciar as discussões, na Figura 10 (a) e (b) são apresentadas duas barras *snap-fit cantilever* — orientadas no plano XY —, configuradas com diferentes estratégias de deposição (preenchimento interno) para o processo FDM (Modelagem por Fusão e Deposição) (AHN *et al.*, 2002; KLAHN *et al.*, 2016).

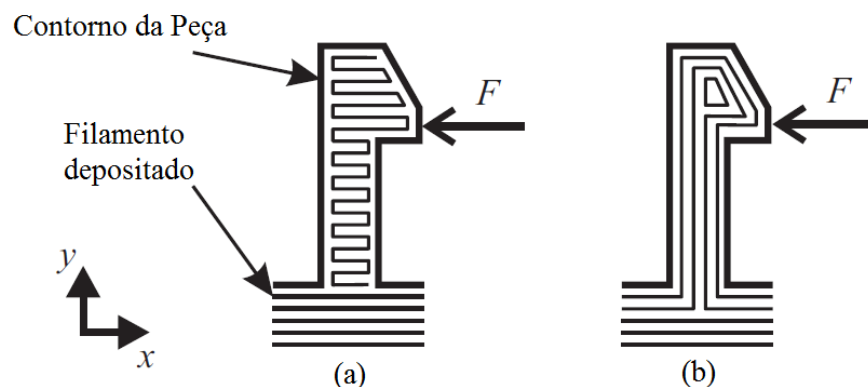


Figura 10 – Estratégias de deposição para um conector *snap-fit* de acordo com Ahn *et al.* (2002), (a) má solução, (b) boa solução (adaptado de KLAN *et al.*, 2016).

No exemplo apresentado na Figura 10 (a), o esforço máximo, neste caso de flexão, é transportado através dos filamentos depositados; em outras palavras, o esforço é aplicado na



região de adesão entre os filamentos, o que faz com que esta estratégia seja considerada inadequada. Já para o caso exposto na Figura 10 (b), os esforços encontram-se ao longo dos filamentos depositados, isto é, a direção mais forte da anisotropia está alinhada ao longo da direção principal dos esforços, tornando tal estratégia de deposição mais favorável (AHN *et al.*, 2002; KLAHN *et al.*, 2016).

Em relação à direção de construção Z, são mostradas novamente na Figura 11 (a) e (b) — disponibilizada por Klahn *et al.* (2016) — duas barras *snap-fit cantilever* com diferentes orientações em relação ao eixo de empilhamento das camadas.

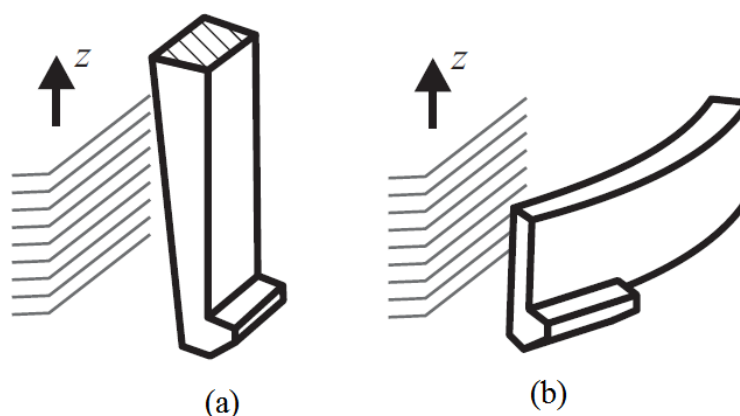


Figura 11 – Orientação da barra *cantilever* em relação a direção de construção (adaptado de KLAHN *et al.*, 2016).

O projeto apresentado na Figura 11 (a) também pode ser considerado inadequado, uma vez que os esforços de flexão se encontram orientados na direção mais fraca do material, além do fato de o efeito escada gerar pontos de concentração de tensão. Por outro lado, a liberdade de projeto na Manufatura Aditiva fornece aos usuários a possibilidade de escolher a direção de deflexão, independentemente da direção de união. Na Figura 11 (b) a barra encontra-se orientada perpendicularmente à direção de empilhamento das camadas. Durante o encaixe de um sistema *snap-fit*, o componente é esforçado ao longo das direções mais fortes do material anisotrópico e os entalhes entre as camadas têm menor impacto sobre a durabilidade da barra *cantilever* (KLAHN *et al.*, 2016).

Quando se usa um processo de Manufatura Aditiva com propriedades mecânicas anisotrópicas, o projetista deve considerar também as cargas. A durabilidade de uma peça aumenta quando é orientada na região de construção de acordo com os esforços principais (KLAHN *et al.*, 2016).

Klahn *et al.* (2016) apresentam um estudo de caso com o objetivo de demonstrar os pontos fortes e as possibilidades da utilização da Manufatura Aditiva para *snap-fits*. O *showcase* utilizado pelos autores consiste em uma tampa de frasco (Figura 12), um elemento encontrado em muitos lares, oficinas e escritórios. Inicialmente um protótipo da tampa foi construído em um equipamento de MA do tipo FDM. O produto final, por sua vez, foi fabricado com a tecnologia de sinterização a laser (SLS), em função do baixo desempenho mecânico das peças por FDM, que levou à delaminação dos filamentos em áreas com grandes deflexões.

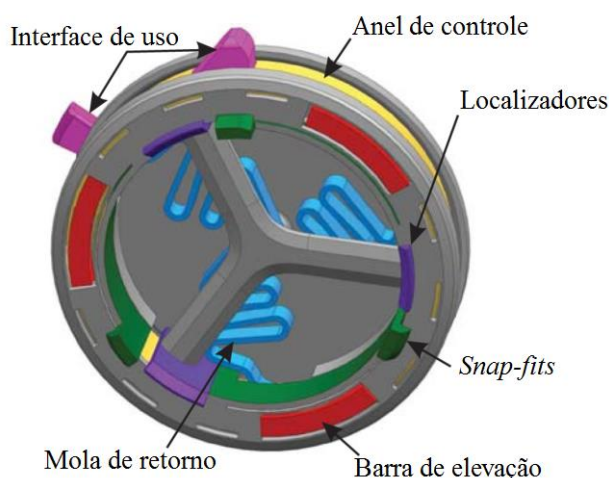


Figura 12 – Tampa com conectores *snap-fit* (adaptado de KLAHN *et al.*, 2016).

O sistema *snap-fit* e outros mecanismos de importância encontram-se destacados na Figura 12. Para Klahn *et al.* (2016), a Manufatura Aditiva apresenta vantagens econômicas para a produção de pequenos lotes — produtos individuais, por exemplo— quando comparada às técnicas convencionais de processamento de plásticos. Os autores destacam ainda que as principais restrições da fabricação aditiva estão relacionadas principalmente à anisotropia nas propriedades mecânicas e ao efeito escada sobre as superfícies manufaturadas<sup>2</sup>.

Por fim, Klahn *et al.* (2016) salientam que, para inserir as restrições anteriormente citadas na concepção do produto, a direção de construção da peça deve ser determinada nas fases iniciais de projeto. Com base nesta decisão, o projetista é capaz de conceber a peça no que diz respeito às propriedades da tecnologia selecionada.

<sup>2</sup> A anisotropia reduz a durabilidade mediante cargas, enquanto o efeito escada dificulta a cinemática dos elementos (KLAHN *et al.*, 2016). Os conceitos de anisotropia e efeito escada serão apresentados nos tópicos especialistas sobre propriedades mecânicas e acabamento das superfícies em peças impressas por FDM/FFF.

Torossian e Bourell (2015) também realizaram um estudo sobre a aplicação da Manufatura Aditiva na fabricação de conexões *snap-fit*, com o objetivo de verificar se os componentes obtidos seriam capazes de realizar a união entre si, para peças em plástico, pelo menos. Um trabalho experimental foi realizado pelos autores para avaliar as forças de montagem e desmontagem ( $F_m$  e  $F_d$ , respectivamente)<sup>3</sup> de *snap-fits* com diferentes parâmetros geométricos para fabricação aditiva. Os parâmetros geométricos escolhidos foram: ângulos de inserção ( $\alpha$ ) e separação ( $\alpha'$ ), e o diâmetro interno da peça de acoplamento (fêmea) ( $D_0$ ), cujos valores testados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros geométricos e respectivos valores (adaptado de TOROSSIAN e BOURELL, 2015).

Parâmetro geométrico	Valor
Ângulo de inserção ( $\alpha$ ) (°)	30, 40, 50, 60, 70, 90
Ângulo de separação ( $\alpha'$ ) (°)	30, 40, 50, 60, 70
Diâmetro interno ( $D_0$ ) (mm)	4, 6, 8, 10

O sistema proposto por Torossian e Bourell (2015) encontra-se representado na Figura 13 (a) e (b) e um desenho em detalhe do mesmo, em (c). Para a fabricação das peças em poliamida 12 (Nylon), foi utilizado um equipamento *3D Systems HiQ Sinterstation*. Foram projetados e fabricados 15 pares de peças, por MA, para a análise proposta. As amostras foram submetidas a ensaios de tensão e compressão<sup>4</sup>, — Figura 13 (d) —, e os resultados obtidos foram comparados com os valores teóricos de força de montagem, previamente calculados.

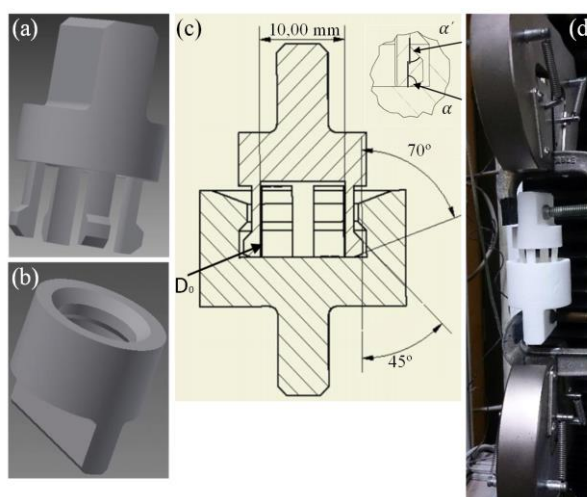


Figura 13 – Encaixe proposto: (a) macho, (b) fêmea, (c) detalhamento e (d) ensaio mecânico (adaptado de TOROSSIAN e BOURELL, 2015).

<sup>3</sup> Nomenclatura apresentada no estudo de Torossian e Bourell (2015).

<sup>4</sup> A compressão caracteriza o sentido de montagem (inserção) (TOROSSIAN e BOURELL, 2015).

De acordo com os autores, os valores teóricos para as forças de montagem e desmontagem foram próximos aos resultados obtidos experimentalmente, conforme mostrado nos gráficos das Figura 14 (a) e (b). Torossian e Bourell (2015) salientam, no entanto, que as curvas experimentais não seguem exatamente as teóricas, o que pode ser explicado em função da dificuldade de se obter uma boa concentricidade entre as duas partes no momento do ensaio. Em seguida, Figura 15, são apresentados os resultados para as forças de montagem e desmontagem em relação ao diâmetro interno (TOROSSIAN e BOURELL, 2015).

Em um aspecto geral, os valores de força obtidos para os ensaios de tensão e compressão, para  $\alpha = \alpha'$ , não são os mesmos. Pelas equações, isto é, teoricamente, os valores para tensão e compressão deveriam ser os mesmos. Tal comportamento observado pode ser justificado pela presença de um grau de deformação durante os ensaios de compressão, quando a carga é aplicada na parte de cima para encaixar com a parte inferior (TOROSSIAN e BOURELL, 2015).

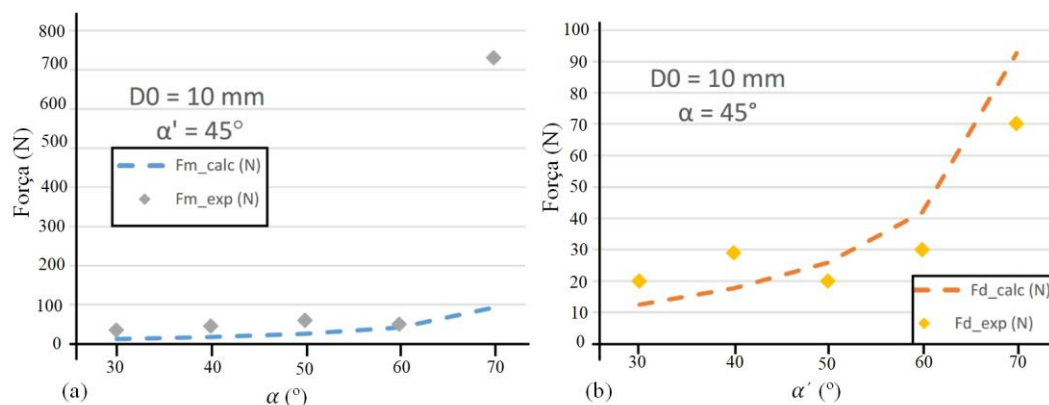


Figura 14 – Força de montagem ( $F_m$ ) em relação ao ângulo de inserção (a) e força de desmontagem ( $F_d$ ) para o ângulo de separação (b) (adaptado de TOROSSIAN e BOURELL, 2015).

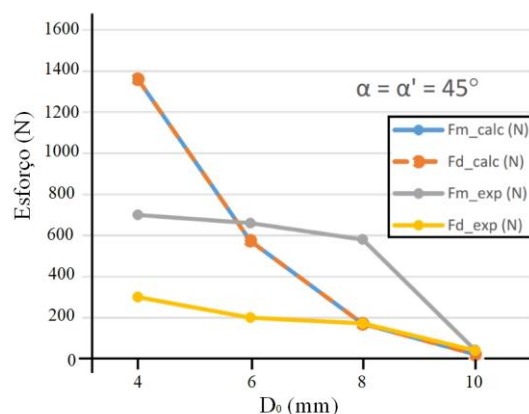


Figura 15 – Forças de montagem ( $F_m$ ) e desmontagem ( $F_d$ ) em relação ao diâmetro interno (adaptado de TOROSSIAN e BOURELL, 2015).

Ainda no cenário da Manufatura Aditiva baseada na tecnologia SLS, Allison *et al.* (2017a) avaliaram a capacidade geométrica e aspectos de resolução da técnica através de um módulo de teste — Figura 16 (a) — contendo diversos elementos de interesse para o projeto em MA, dentre estes, conexões *snap-fit* — Figura 16 (b).

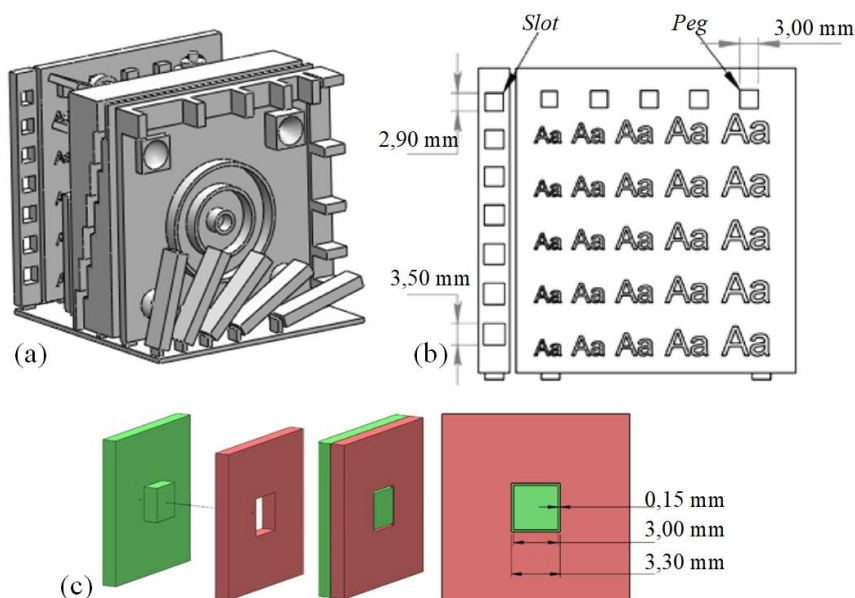


Figura 16 – (a) “Cubo teste” (adaptado de ALLISON *et al.*, 2017 b *apud* ALLISON *et al.*, 2017 a), *snap-fit* (b) e (c) projeto de sistema de encaixe (folgas) (adaptado de ALLISON *et al.*, 2017 a) .

A análise das folgas necessárias para os sistemas *snap-fit*, realizada pelos autores, consistiu em encaixar pinos de geometrias quadrada (*peg*), com dimensões de 3 mm, em cavidades (*slots*) com diferentes tamanhos, variando entre 2,9 mm a 3,5 mm, com incrementos de 0,1 mm. De acordo com os mesmos, a resolução da conexão é então definida pela folga entre o pino e a cavidade, que fornece o ajuste mais confortável ao sistema. Allison *et al.* (2017a) definiram, portanto, que a melhor regulagem entre os elementos foi com distâncias de 0,15 mm e 0,20 mm — Figura 16 (c).

Seguindo com a apresentação de estudos sobre a aplicação de MA ao cenário dos *snap-fits*, Udriou (2012), em seu artigo, sugere a utilização da tecnologia *PolyJet*<sup>®</sup> (*Polymer Jetting*). Um dos projetos abordados pelo autor consiste em uma montagem constituída basicamente por duas partes, conforme mostrado na Figura 17 (a). Durante o processo de encaixe do sistema *snap-fit*, uma interferência de 2 mm entre as duas partes foi detectada — Figura 17 (b).

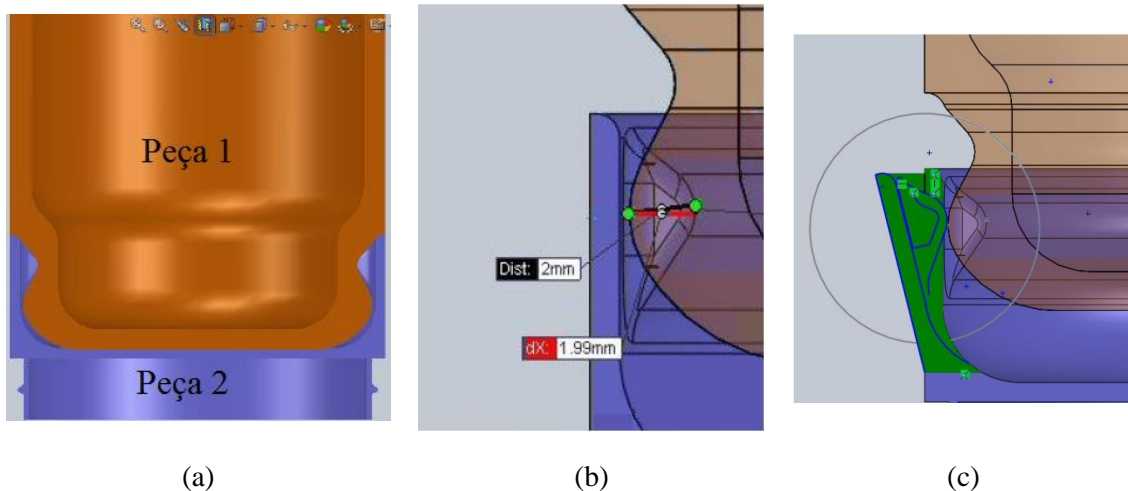


Figura 17 – Montagem *snap-fit* (a), interferência entre as peças (b) e (c) flexibilidade, peça inferior (adaptado de UDROIU, 2012).

O material utilizado na Peça 2, Figura 17 (a), deve dispor de flexibilidade específica, resistência e tenacidade, para permitir a montagem *snap-fit* — Figura 17 (c). Três fotopolímeros — *FullCure 720*, *VeroBlack* e *DurusWhite* — foram testados para a confecção da Peça 2. Um exemplo dos componentes impressos e montados é apresentado na Figura 18 (a) (UDROIU, 2012)<sup>5</sup>.

Durante os testes do sistema *snap-fit*, as peças fabricadas em *FullCure 720* e *VeroBlack* sofreram pequenas fissuras. Após três testes, a peça em *FullCure 720* quebrou. O material com melhores resultados de montagem foi o *DurusWhite*, usado na confecção da Peça 2 — Figura 18 (b) —, uma vez que forneceu as características necessárias para o funcionamento do sistema, isto é, excelente flexibilidade, resistência e tenacidade, conforme citado anteriormente (UDROIU, 2012).

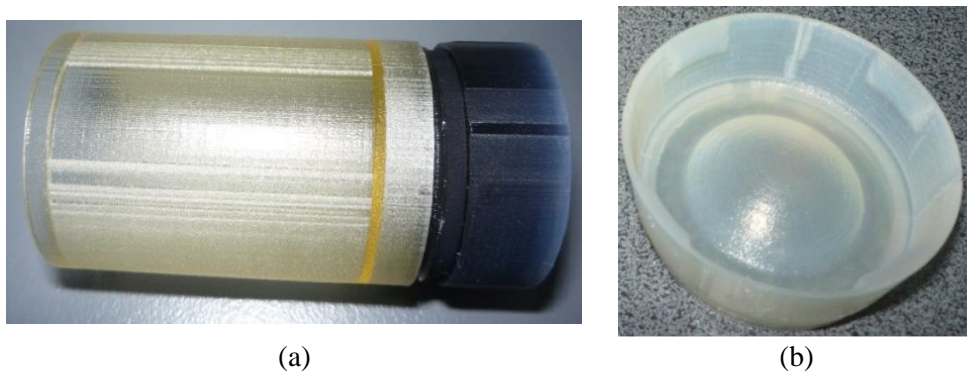


Figura 18 – Teste de montagem (a), peça fabricada com o material *DurusWhite* (b) (adaptado de UDROIU, 2012).

<sup>5</sup> A montagem apresentada na Figura 18 (a) corresponde a uma peça fabricada com o material *VeroBlak* e outra com *FullCure 720* (UDROIU, 2012).



Seidl *et al.* (2015) utilizaram a tecnologia de Manufatura Aditiva, em conjunto com simulações numéricas, para otimizar as geometrias de conexões *snap-fit*. Em síntese, os autores criaram protótipos a partir da Impressão 3D para testar em condições reais fatores como a funcionalidade e a repetibilidade dos encaixes *snap-fit* projetados.

O equipamento utilizado para a fabricação dos protótipos no estudo de Seidl *et al.* (2015), assim como no trabalho anteriormente apresentado, é baseado na tecnologia *PolyJet*®. Especificamente, o modelo de máquina utilizado foi uma *Objet Connex 500*, que segundo os autores, caracteriza-se por uma impressora 3D capaz de combinar dois fotopolímeros, fornecendo assim uma vasta gama de propriedades para a composição final.

O material selecionado pelos autores para a construção dos componentes foi o *VeroWhite* que, de acordo com os mesmos, apresenta propriedades mecânicas semelhantes ao Nylon 6.6. Para a construção de *snap-fits* deformáveis, aproveitando a possibilidade do equipamento em combinar materiais, o elemento base foi modificado com a adição de um componente flexível *TangoBlackPlus*, em proporção suficiente para assegurar um comportamento próximo a um PP (Polipropileno) na mistura final. Os protótipos obtidos por Seidl *et al.* (2015) estão apresentados na Figura 19.

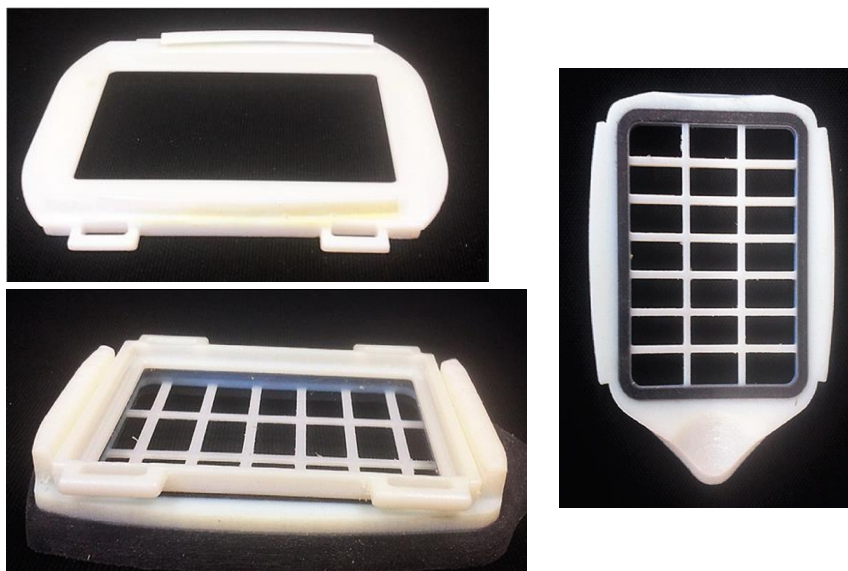


Figura 19 – Protótipo fabricado por Seidl *et al.* (2015) (adaptado de SEIDL *et al.*, 2015).

Bareta *et al.* (2011) desenvolveram um artigo com o objetivo de auxiliar o projeto de elementos *snap-fits* em peças prototipadas pelo método *Ink Jet Printing*, a partir da análise do desempenho mecânico dos protótipos em relação ao dimensionamento de uma peça polimérica

a ser obtida por processos tradicionais. Os autores exploraram em seu estudo três tipos de montagem: ganchos elásticos, montagens cilíndricas e rótulas.

Experimentalmente, o trabalho de Bareta *et al.* (2011) teve início com a caracterização da resina utilizada para fabricação das peças, neste caso a *FullCure 720*. Foram realizados ensaios mecânicos — tração, impacto, compressão e flexão — com amostras diretamente prototipadas, cujos resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades da resina *FullCure 720* obtidas com 90 dias (BARETA *et al.*, 2011)

Propriedade	Norma - ASTM	Valor
Resistência à tração	D638-03	35,4 MPa
Módulo de Elasticidade	D638-04	1946 MPa
Resistência à Flexão	D790-03	36,9 MPa
Módulo de flexão	D790-04	1333 MPa

Os autores também avaliaram os corpos de prova em relação ao “tempo de envelhecimento”, isto é, realizaram ensaios em peças após um dia de prototipagem, um mês, dois meses e seis meses. Relativamente a esta análise, os autores observaram que a resina continua o processo de cura com o tempo, alterando o comportamento mecânico do material. Em um período de até noventa dias, as propriedades mecânicas diminuem, estabilizando as características em um “tempo de envelhecimento” de cento e oitenta dias. O efeito percebido por Bareta *et al.* (2011) ocorreu tanto nos ensaios de tração, quanto nos de flexão (Figura 20 e Figura 21).

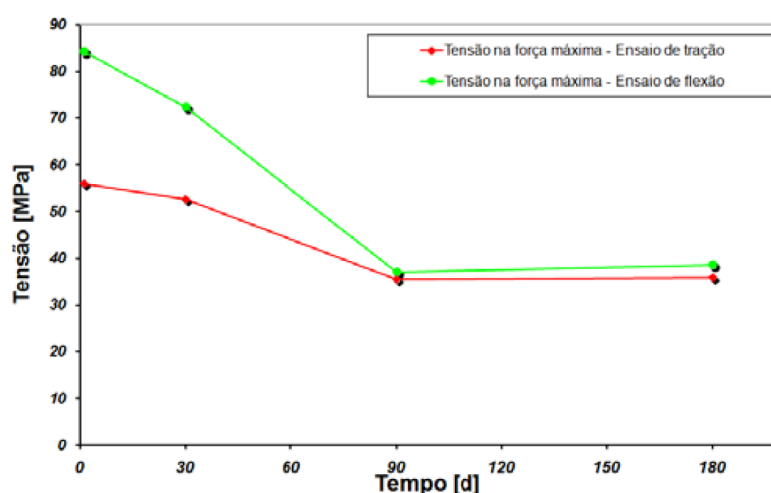


Figura 20 – Tensão vs. tempo de envelhecimento (BARETA *et al.*, 2011)



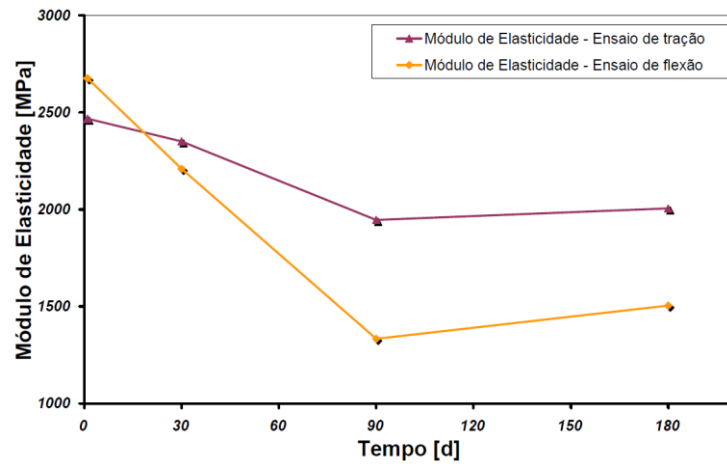


Figura 21 – Módulo de elasticidade vs. tempo de envelhecimento (BARETA *et al.*, 2011)

Ainda sobre o material, Bareta *et al.* (2011) identificaram se tratar de uma resina acrílica. Seguindo com a apresentação do estudo, conforme citado anteriormente, os autores estudaram três geometrias no contexto dos *snap-fits*: gancho elástico reto, anelar e rotular — Figura 22 (a), (b) e (c), respectivamente.

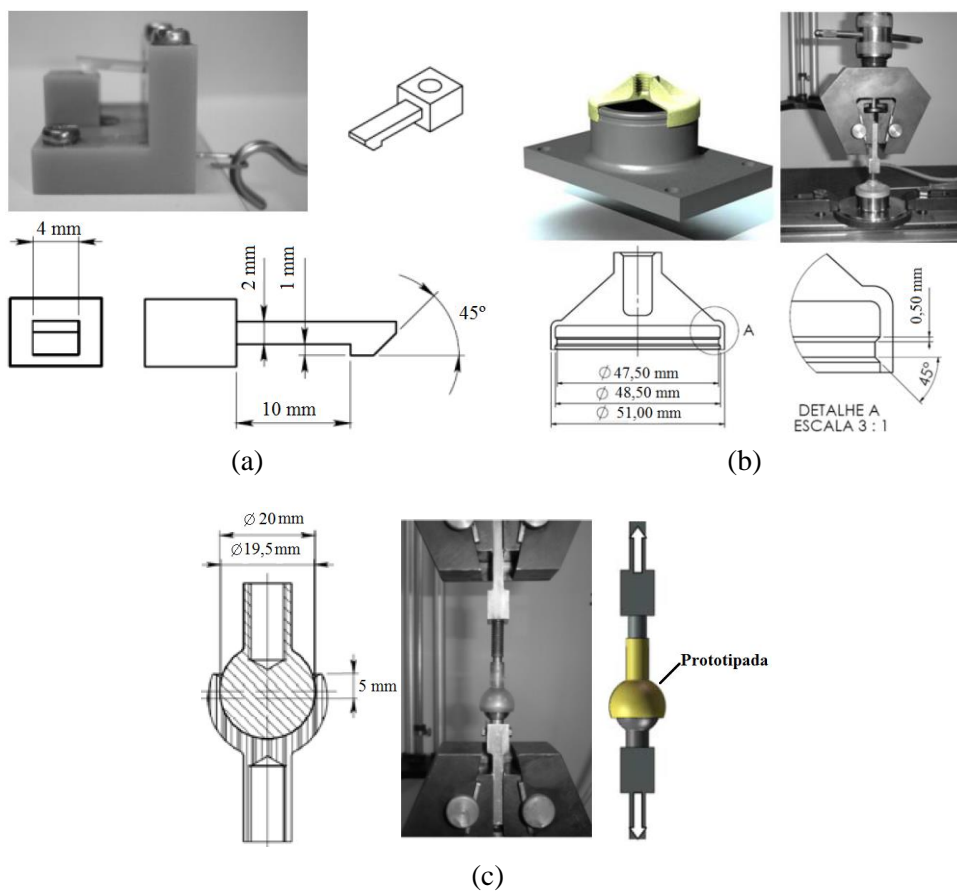


Figura 22 – *Snap-fit* tipo gancho (a), anelar (b) e rotular (c) (adaptado de BARETA *et al.*, 2011).

Os autores realizaram uma série de experimentos para identificar a força de montagem para cada uma das geometrias estudadas e os resultados foram comparados com valores estabelecidos a partir de relações matemáticas. Bareta *et al.* (2011) destacam que para o engate anelar, a primeira amostra obtida foi descartada, uma vez que não se obteve um acoplamento adequado, descaracterizando o ensaio<sup>6</sup>. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Força de montagem para os diferentes engates (adaptado de BARETA *et al.*, 2011).

Tipo de engate	Força de montagem (N)				Diferença (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Calculado	
Anelar	309,3	311	328,6	314,5	0,63
Gancho reto	12,84 ±0,21	13,87 ±0,19	12,32 ±0,31	11,99	7,84
Rotular	75,64 ±1,82	111,24 ±3,29	122,63 ±4,48	110,98	5,08

Em relação ao desacoplamento, no engate anelar foi observado que a vida útil deste tipo de conexão é limitada, uma vez que a força de desmontagem apresentou uma queda de 3% em função do fato de que cada amostra foi ensaiada cinco vezes (BARETA *et al.*, 2011). De acordo com os autores, mediante tal comportamento, os projetistas devem considerar, na etapa de desenvolvimento, a quantidade de vezes que o protótipo poderá ser usado, uma vez que se observa uma queda de rendimento em peças fabricadas com o tipo de resina aplicada, em função do relaxamento da mesma.

Para Bareta *et al.*, 2011, os resultados obtidos servem para disponibilizar aos projetistas ferramentas para o dimensionamento de protótipos que possuam engates rápidos. Além disto, os autores evidenciam que os protótipos apresentaram uma queda significativa no seu desempenho mecânico após o primeiro uso.

Ashour e Kersaudy-Kerhoas (2017) projetaram, simularam, fabricaram e testaram um sistema *snap-fit*, impresso pela tecnologia *PolyJet*<sup>®</sup> com o material VeroGray, com a finalidade de melhorar o fluxo entre módulos, em um conjunto de montagem microfluídico para separação de plasma sanguíneo. A função da conexão em questão era a fixação de uma pequena placa em PMMA (*chip*). O objetivo do projeto, segundo os autores, foi atingido com sucesso, uma vez que a nova concepção permitiu a inserção e a permanência do *chip* com firmeza. Além disso, garantiu uma redução de 62% no tamanho do mesmo, pois eliminou os furos para fixação por parafusos, descartou o uso de adesivos e minimizou a interferência humana — Figura 23 (a),

<sup>6</sup> A comparação entre o valor calculado e o valor ensaiado foi obtido a partir da média das duas amostras seguintes (2 e 3) (BARETA *et al.*, 2011).

(b) e (c). É importante mencionar também que os autores, em um dos seus testes de montagem, depararam-se com a quebra de um dos *snap*s.

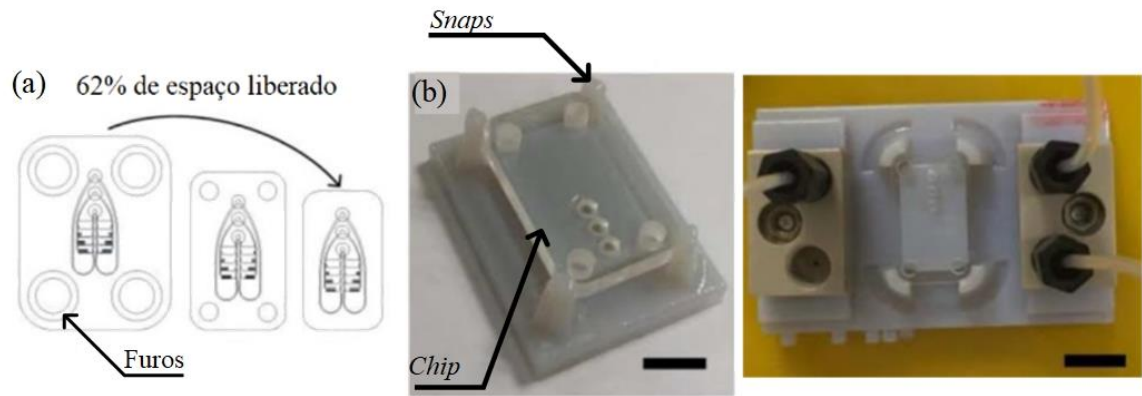


Figura 23 – Espaço liberado no *chip* (a), montagem da placa com *snap-fits* (b) e (c) sistema completo (adaptado de ASHOUR e KERSAUDY-KERHOAS, 2017).

No contexto do processo FDM (Modelagem por Fusão e Deposição), a *Stratasys*<sup>®</sup> apresenta soluções em materiais para *snap-fits*. O FDM<sup>®</sup> Nylon 12 é um material destinado a aplicações que requerem: *snap-fits* repetitivos, alta resistência à fadiga, forte resistência química e insertos de pressão (atrito) (*press fit inserts*) (STRATASYS, 2013). Na página da empresa na Internet são apresentadas algumas imagens de peças contendo conexões *snap-fit*, fabricadas com FDM<sup>®</sup> Nylon 12— Figura 24 (a) e (b). As propriedades do material são apresentadas na Tabela 4.

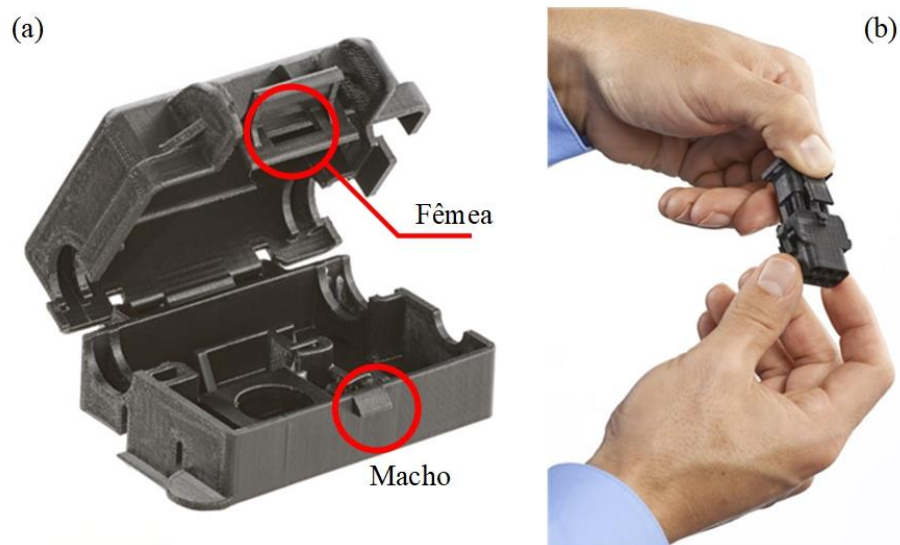


Figura 24 – Caixa de bateria por impressão 3D (a), *snap-fit* impresso (b) (adaptado de STRATASYS, [2016]).

Tabela 4 – Propriedades do FDM<sup>®</sup> Nylon 12, *CONDITIONED*<sup>7</sup> e *UNCONDITIONED (DRY)*<sup>8</sup> (adaptado de STRATASYS, 2013).

Propriedades mecânicas	Norma	Valor	
		<i>CONDITIONED</i>	<i>UNCONDITIONED (DRY)</i>
Resistência à tração (MPa)	ASTM D638	48,26	53
Módulo de elasticidade (MPa)	ASTM D638	1310	1310
Deformação ( <i>Break</i> ) (%)	ASTM D638	30	9,5
Deformação ( <i>Yield</i> ) (%)	ASTM D638	6,5	6,5
Resistência à flexão (MPa)	ASTM D790	68,95	70
Módulo de flexão (MPa)	ASTM D790	1310	1310
Deformação na flexão ( <i>Break</i> )	ASTM D790	<i>No Break</i>	<i>No Break</i>
Impacto IZOD (notched)	ASTM D256	200 J/m	150 J/m
(unnotched)	ASTM D256	>2,000 J/m	>2,000 J/m

Chacón *et al.* (2017) realizaram um estudo com o objetivo principal de avaliar as propriedades mecânicas à tração e flexão de peças PLA, obtidas pela tecnologia FDM, mediante a variação de parâmetros de processo, tais como: orientação de construção, espessura de camada e a taxa de alimentação (*feed rate*). Os trabalhos foram conduzidos, basicamente, utilizando modelos, peças, padronizados para cada um dos ensaios mencionados anteriormente. Contudo, com o intuito de demonstrar de forma prática os efeitos das variáveis de impressão estudadas, os autores projetaram um sistema *snap-fit* e o avaliaram sob esforços de tração — Figura 25 (a) e (b).

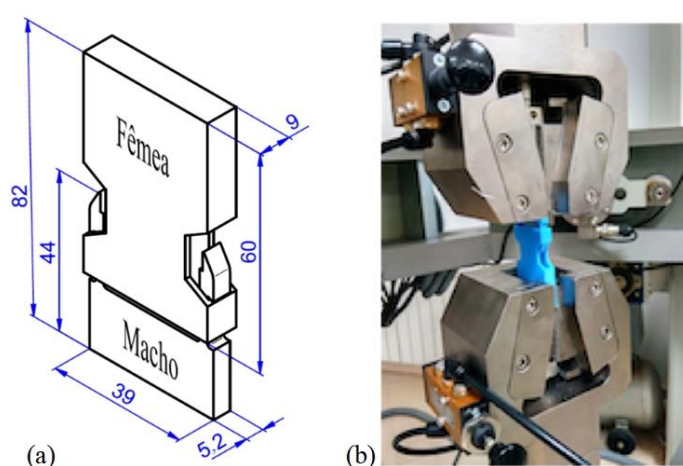


Figura 25 – Sistema *snap-fit* (dimensões em mm) (a) e (b) ensaio de tração (adaptado de CHACÓN *et al.*, 2017).

<sup>7</sup> Conditioned: as amostras são condicionadas de acordo com o procedimento A da ASTM D638 (40 horas @ 23 °C e com 50% de umidade relativa) (STRATASYS, 2013).

<sup>8</sup> Unconditioned: como impresso (sem remoção de suporte solúvel) (STRATASYS, 2013).

Em simples palavras, o módulo iniciou o teste encaixado e foi aplicada uma carga para remover as partes, medindo, portanto, a força máxima suportada pela montagem. De acordo com Chacón *et al.* (2017), a combinação dos parâmetros afetou significativamente a força máxima suportada pelos encaixes, com valores médios entre (149 a 341) N. Tais conjunturas atuaram também na variação do comportamento dúctil-frágil das peças Figura 26.



Figura 26 – Diferentes modos de fratura dos machos (adaptado de CHACÓN *et al.*, 2017).

Por fim, Kovacs *et al.* (2017) desenvolveram um sistema de integração chamado *TrussFab*, cujo objetivo era permitir a construção de estruturas de larga escala, capazes de suportar a massa de um humano. Para tal, o conceito é baseado em um modelo em que a Impressão 3D é complementada por garrafas PET, que atuam como vigas nos produtos gerados. A união entre as garrafas é realizada por uma conexão impressa, por tecnologia baseada em extrusão, a qual contém elementos de fixação caracterizados por conectores roscados e *snap-fits* — Figura 27 (a).



Figura 27 – Conceito do conector impresso (a), montagem com as garrafas (b) (adaptado de KOVACS *et al.*, 2017).



A conexão *snap-fit* desliza para o interior da garrafa, de forma a segurá-la por dentro. Um conjunto de três barras *cantilever* defletem durante o processo de inserção, até que o espaço interno da garrafa seja suficiente para que o sistema volte a sua posição inicial e, portanto, garanta a fixação — Figura 27 (b) (KOVACS *et al.*, 2017). Segundo os autores, os conectores *snap-fit*, fabricados em ABS em uma impressora 3D desktop Makerbot 2x, suportaram cargas de tração de aproximadamente 145 kg. Em aplicação, o estudo mostra produtos como uma ponte de 2,5 m, cadeiras e mesas, e um barco — Figura 28 (a), (b) e (c), respectivamente.



Figura 28 – *TrussFab* montagens: (a) ponte, (b) cadeiras e mesa, e (c) barco (adaptado de KOVACS *et al.*, 2017).

## 2.4 MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO

A Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) é uma das tecnologias mais difundidas quando o assunto é a Manufatura Aditiva por extrusão, sendo as primeiras patentes do processo atribuídas ao fundador da empresa *Stratasys*®, Scott Crump, em 1992 (GIBSON *et al.*, 2015). A tecnologia tem sido amplamente utilizada na fabricação aditiva para a confecção de protótipos funcionais, padrões e peças finais, em diversos ramos, tais como as indústrias automobilística, aeroespacial, de consumo, produtos médicos, entre outras. A aplicabilidade da técnica é decorrente de sua capacidade de produzir geometrias complexas, de forma precisa e segura até mesmo em ambientes como escritórios (BRYDEN, 2014; MOHAMED *et al.*, 2015).

O processo FDM utiliza filamentos termoplásticos para a fabricação das peças. Os modelos podem ser construídos em uma vasta gama de materiais, entre os quais, Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Polifenilsulfona (PPSF), Policarbonato (PC), misturas de PC-ABS,

Acrilonitrila Estireno Acrilato (ASA), FDM Nylon 12, entre outros (LIOU, 2008; MOHAMED *et al.*, 2015, VOLPATO *et al.*, 2017). O princípio de funcionamento da tecnologia é representado esquematicamente na Figura 29.

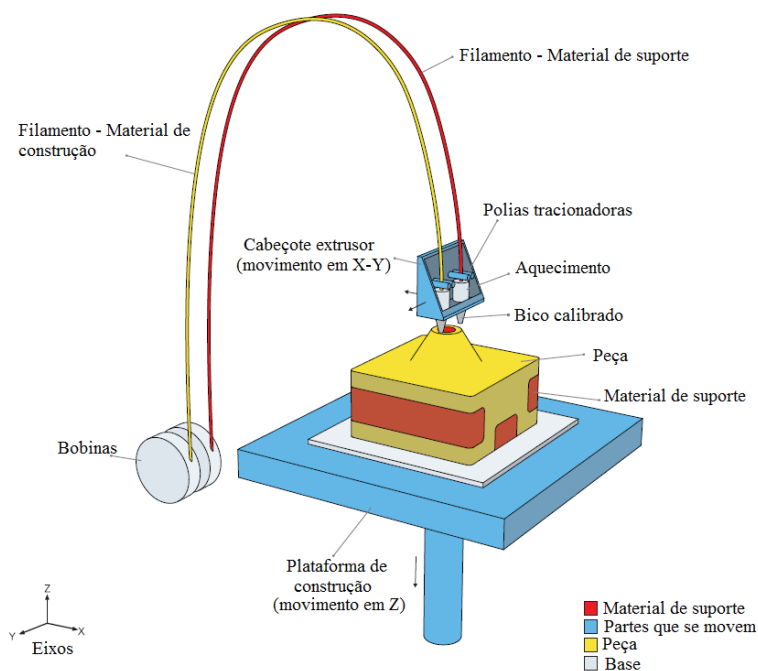


Figura 29 – Princípio do processo FDM da Stratasys<sup>®</sup> (Adaptado de BRYDEN, 2014).

O material de alimentação do processo, os filamentos termoplásticos, encontra-se enrolado em uma bobina, conforme representado na Figura 29. A condução do material até o cabeçote extrusor é realizada por um sistema composto por um par de polias, o qual é responsável por tracionar o filamento da bobina e empurrá-lo ao longo de um canal aquecido, até que o mesmo chegue a um estado semi-líquido ou pastoso. Neste processo o próprio filamento, ao ser tracionado, atua como um “êmbolo” no início do cabeçote para expulsar o material através de um bico calibrado. O cabeçote extrusor percorre trajetórias enquanto deposita o material resultante da extrusão sobre a plataforma de construção, ao longo dos eixos X e Y. A plataforma de construção, por sua vez, move-se para baixo em Z, equivalente à espessura de uma camada (STRATASYS, 1992; VOLPATO *et al.* 2007; KRETSCHEK, 2012; SANTANA, 2015; MUEHLENFELD e ROBERTS, 2019). Após a deposição, o filamento pastoso — material de construção ou suporte — solidifica-se por transferência de calor para a camada anterior (já depositada) e forma uma camada sólida (GEBHARDT, 2011).

Conforme representado na Figura 29, o sistema FDM dispõe de dois bicos, sendo um para o material de construção da peça e outro para o de suporte. Este é utilizado em situações nas

quais existem regiões que não estão conectadas ao corpo principal da peça, suspensas, ou em superfícies inclinadas, com ângulos abaixo do de autossuporte (em torno de  $45^\circ$ ). Neste sentido, a falta de um suporte resulta em regiões sem apoios e, portanto, sem possibilidade de construção, pois o bico depositaria material em um espaço vazio (PHAM e GAULT, 1998; VOLPATO *et al.*, 2007; MAGALHÃES, 2010; VOLPATO *et al.*, 2017; REDWOOD *et al.*, 2017).

Uma forma simples de entender a necessidade do uso de suportes na tecnologia FDM é apresentada por Redwood *et al.* (2017), baseada na construção das letras Y, H e T, Figura 30. De acordo com os autores, os braços do “Y” podem ser fabricados sem suportes, uma vez que apresentam inclinações iguais ou maiores que  $45^\circ$ . O “H” apresenta uma ponte na região central; caso esta tenha um comprimento abaixo de 10 mm, é possível imprimir sem suporte, caso contrário, as estruturas devem ser aplicadas. Por fim, no caso do “T”, não há nada para sustentar seus braços e, portanto, estes simplesmente cairão na ausência de suportes.

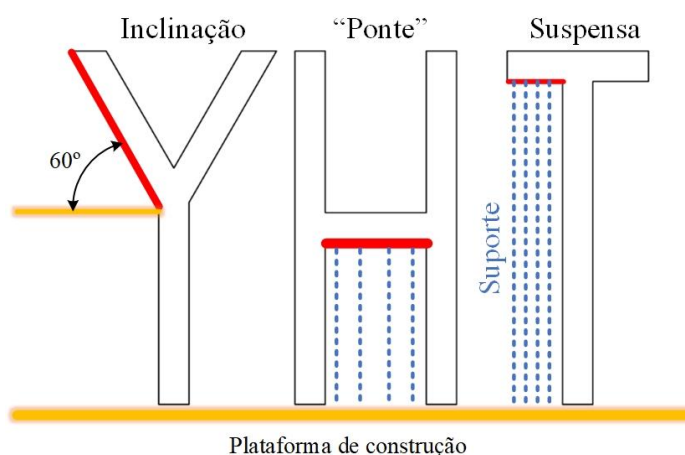


Figura 30 – Regra Y, H e T para suportes (baseado nos conceitos de REDWOOD *et al.*, 2017).

As estruturas de suporte também são utilizadas para garantir a integridade estrutural das peças fabricadas. Os materiais durante o processo de impressão estão sujeitos a variações térmicas que podem conduzir a efeitos de contração e formação de tensões residuais. A ação desses fenômenos pode gerar empenamento, delaminação das camadas, entre outras falhas nas peças (ZHAO *et al.*, 2018).

O material de suporte deve ser removido, o que pode ser feito por imersão em um tanque com água, no caso de ser solúvel a este meio, sendo a maneira mais conveniente e de fácil remoção, ou por processos manuais (LIOU, 2008; BRYDEN, 2014; VOLPATO *et al.*, 2017). No Quadro 3 são apresentadas algumas vantagens e desvantagens do processo FDM (ALVES



*et al.*, 2001; CHUA *et al.*, 2003; LIOU, 2008; KAMRANI e NASR, 2010; GEBHARDT, 2011; BRYDEN, 2014, VOLPATO *et al.*, 2017):

Quadro 3 – Resumo das principais vantagens e desvantagens do processo FDM, de acordo com a literatura (ALVES *et al.*, 2001; CHUA *et al.*, 2003; LIOU, 2008; KAMRANI e NASR, 2010; GEBHARDT, 2011; BRYDEN, 2014; VOLPATO *et al.*, 2017).

Vantagens	Desvantagens
Processo limpo e com pouco desperdício;	Delaminação: baixa resistência interlaminar (determinados materiais). Tendência de delaminar quando flexionadas ou a se distorcer ao longo das bordas das camadas;
Variedade de materiais de construção, inclusive polímeros de engenharia;	Precisão dimensional e resolução restritas;
Materiais estáveis mecânica e quimicamente, e com boa resposta à intemperes;	Necessidade suportes em regiões suspensas, ou com ângulos fora da faixa de autossuporte. Dependendo da geometria, os custos com material de suporte podem ser elevados;
Simplicidade do princípio de deposição e facilidade de mudança de material;	Operação de pós-processamento para remover os suportes;
Capacidade de ser utilizado em escritórios, já que alguns materiais não necessitam de exaustão para remover odores;	Processo lento: a velocidade de construção é limitada pela taxa de extrusão ou fluxo de material através do cabeçote de extrusão. Materiais plásticos, apresentam viscosidade relativamente alta, e, portanto, o processo não pode ser acelerado;
Fabricação de componentes funcionais: com ABS, por exemplo, é possível construir, dependendo do equipamento, peças funcionais com resistência em torno de 85% da peça moldada;	Contração imprevisível: como no processo FDM o material extrudado pelo cabeçote esfria muito rápido, tensões induzidas por este efeito são introduzidas no modelo. Pode ser compensado através do ajuste de parâmetros de processo
Fácil remoção do material de suporte.	

#### 2.4.1 Manufatura Aditiva por extrusão e o cenário *open source*

*Open source* (OS) é tipicamente utilizado para descrever segmentos como produtos, serviços e ideias, nos quais a contribuição intelectual dos inventores não é de natureza proprietária. O termo tem como origem o cenário da computação, no qual o código fonte de um programa é aberto para a visualização e modificação, e não há nenhum custo associado ao *download* e ao uso. A terminologia “*open source*” tornou-se comum para descrever movimentos que utilizam filosofias semelhantes à aplicação de OS em *softwares* (PITT *et al.*, 2006).

O princípio colaborativo e aberto de licenças FOSS (*Free and Open Source Software*) pode ser facilmente transferido para o projeto de *hardwares* científicos (PEARCE, 2012). Neste contexto, um *hardware* livre e de código aberto (*Free and Open Source Hardware* – FOSH)

corresponde a um dispositivo cujo projeto é disponibilizado ao público e qualquer pessoa pode estudar, modificar, distribuir, fazer e vender o projeto ou *hardware* baseado no mesmo (PEARCE, 2014).

Plataformas de *software* e *hardware* de código aberto apresentam igualmente duas funções fundamentais: (i) funcionar como uma plataforma social e (ii) fornecer ferramentas para permitir a colaboração eficiente. Atuar como uma plataforma social consiste em criar a consciência de projetos de *hardware open source* e permitir que iniciadores de projetos, participantes e partes interessadas se encontrem, formando assim, uma base para a comunidade. A segunda função fundamental é fornecer à comunidade as ferramentas corretas, ferramentas de colaboração como repositórios de projetos e *wikis* (HANSEN e HAWARD, 2013).

A plataforma Arduino, desenvolvida no Instituto Ivrea (Itália), é considerada o primeiro grande sucesso em larga escala de *hardware* livre. O conceito de *hardware open source* cresceu em torno do Arduino, tornando-o um elemento característico para toda a comunidade. As primeiras iniciativas neste sentido foram em função de modificações nas placas Arduino, como o desenvolvimento de novos sistemas e *kits* de eletrônica. No entanto, os últimos avanços nas ferramentas de código aberto caracterizam-se, por exemplo, por equipamentos de corte a *laser*, e Impressoras 3D (GIBB *et al.*, 2015).

Usando o Arduino como “cérebro”, muitas impressoras 3D para a fabricação aditiva em camadas, com inúmeros materiais — como polímeros, cerâmicas, entre outros —, vem sendo desenvolvidas. O projeto mais famoso no contexto da impressão tridimensional consiste no *RepRap* (*Replicating Rapid – prototyper*) (PEARCE, 2014). Um exemplo dessas máquinas é apresentado na Figura 31.

Originalmente criado pelo Dr. Adrian Bowyer da Universidade de Bath (Reino Unido), em 2005, o projeto *RepRap* buscou criar uma nova tendência de impressoras 3D tipo *desktop*. Nascido a partir de patentes do processo FDM<sup>9</sup>, agora já em domínio público, o projeto desde o início foi concebido para se auto replicar<sup>10</sup>. O núcleo do projeto *RepRap* foi publicado com base em licenças GNU (*General Public License*), isto é, os arquivos são livres e qualquer pessoa pode usá-los, contanto que qualquer modificação feita no projeto seja publicada sob a mesma licença (HORNE, 2015; BARNATT, 2014).

---

<sup>9</sup> O processo de “Fabricação por Filamento Fundido” (*Fused Filament Fabrication* - FFF), foi utilizado como método para os equipamentos *RepRap*, e corresponde a uma variante da tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) (YANAMANDRAM e PANCHAL, 2014).

<sup>10</sup> O conceito de se auto replicar está relacionado ao fato de que o equipamento pode fabricar aproximadamente 50% de suas próprias partes (PEARCE, 2014).

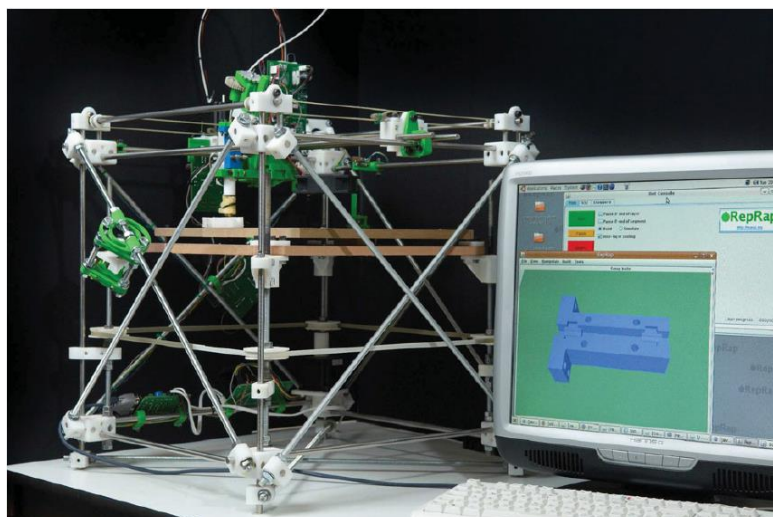


Figura 31- RepRap “Darwin”, versão 1 (JONES *et al.*, 2011).

Outra importante iniciativa no contexto de impressoras 3D de código aberto foi o projeto *Fab@Home* que, assim como o *RepRap*, buscou difundir a tecnologia de Manufatura Aditiva para curiosos, inventores e empreendedores, criando também um site que possibilitasse aos usuários colaborar para a evolução dos equipamentos (MALONE e LIPSON, 2007).

O projeto *Fab@Home* teve início em 2006 na Universidade de Cornell (Estados Unidos), impulsionado por Hod Lipson e Evan Malone. Diferentemente do projeto *RepRap*, que era centrado no conceito de máquina autorreplicante, o *Fab@Home* buscava a fabricação polivalente. As impressoras oriundas do projeto apresentavam como particularidade a utilização de seringas intercambiáveis como cabeça de extrusão — Figura 32 (a) —, permitindo assim o uso de uma grande variedade de materiais, como: silicone, chocolate, cobertura de açúcar, queijo, plasticina, entre outros (BERCHON e LUYT, 2014). Um exemplo de cabeçote especialista, desenvolvido por Ferreira e Alves (2017) em plataforma aberta de impressão 3D para o processamento de pastas de açúcar, é apresentado na Figura 32 (b).

Diferentemente dos modelos comerciais de máquinas baseadas na modelagem por fusão e deposição, os modelos desenvolvidos com base no conceito de código aberto permitem maior flexibilidade e adaptações para pesquisas, já que muitas vezes possibilitam o acesso aos protocolos de controle e funcionamento da tecnologia utilizada. Equipamentos baseados no conceito de *hardware* e *software* abertos facilitam o acesso às tecnologias de manufatura aditiva, para o desenvolvimento em diversas áreas de pesquisa (PALLAROLAS, 2013). De acordo com Gonzalez e Bennett (2014), a Impressão 3D pode ser utilizada em uma ampla variedade de cursos superiores, incluindo arte, arquitetura, e classes de projeto em engenharia, especialmente mecânica, civil e aeroespacial. Em síntese, o surgimento dos movimentos de

código aberto no cenário da impressão 3D democratizou a tecnologia tornando-a acessível a um vasto público (SANTOSO, *et al.*, 2013). Por fim, um diagrama de fatores de influência no comportamento de impressoras 3D baseadas em código aberto é apresentado na Figura 33 (SANCHEZ *et al.*, 2014).

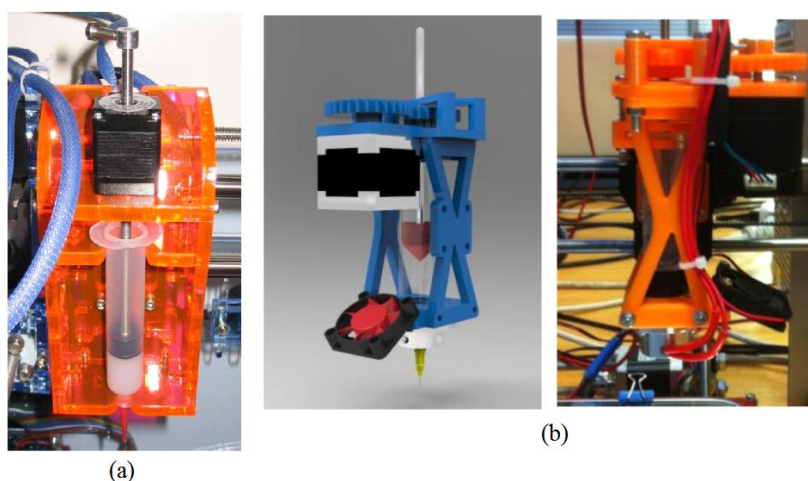


Figura 32 – Sistema de deposição Fab@home (adaptado de MALONE e LIPSON, 2007) (a), extrusor de pasta de açúcar (FERREIRA e ALVES, 2017) (b).

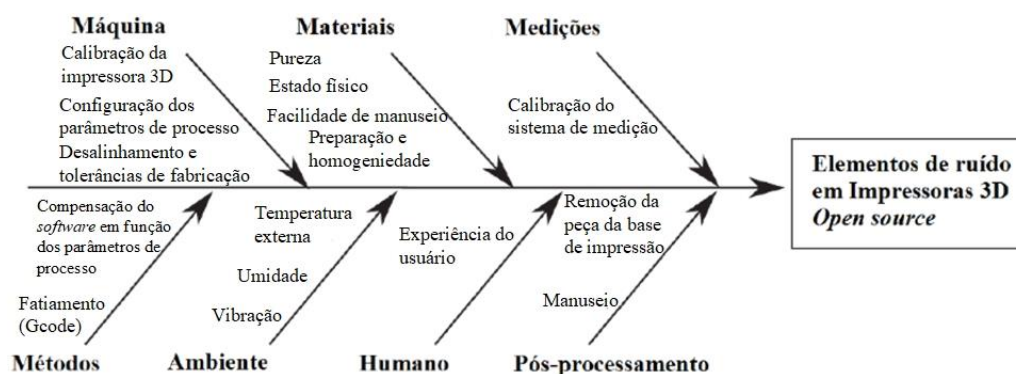


Figura 33 – Diagrama de Ishikawa para os fatores de influência em impressora 3D *open source* (adaptado de SANCHEZ *et al.*, 2014).

## 2.4.2 Parâmetros de processo FDM/FFF

A chave para o sucesso dos processos de Manufatura Aditiva, que incluem o processo FDM, depende da adequada seleção dos parâmetros de processo. Um mesmo conjunto de parâmetros pode ter efeitos distintos para as diferentes propriedades que se deseja para um determinado produto. Tais variáveis são importantes, uma vez que afetam aspectos como: tempo de construção, uso de material, propriedades mecânicas, precisão dimensional e qualidade das superfícies das peças fabricadas (ALI *et al.*, 2014; MOHAMED *et al.*, 2015,

HUANG *et al.*, 2019). Ali *et al.* (2014) alertam, porém, que a seleção dos parâmetros pode resultar em relações inversas, como por exemplo, mínimo tempo de construção com baixa resistência da peça. Neste sentido, o ajuste das variáveis e as relações de compromisso dependem da aplicação final das peças.

Inicia-se a apresentação dos parâmetros de processo com a descrição da variável espessura de camada (*layer thickness*). Também chamada de altura de camada (*layer height*), Figura 34, é responsável pela resolução geométrica das peças impressas e corresponde à espessura do filamento depositado em cada camada. A espessura de camada é dependente do material e do diâmetro do bico utilizado (SOOD *et al.*, 2009; MOHAMED *et al.*, 2015; AKANDE, 2015; CARNEIRO *et al.*, 2015; GOH *et al.*, 2019).

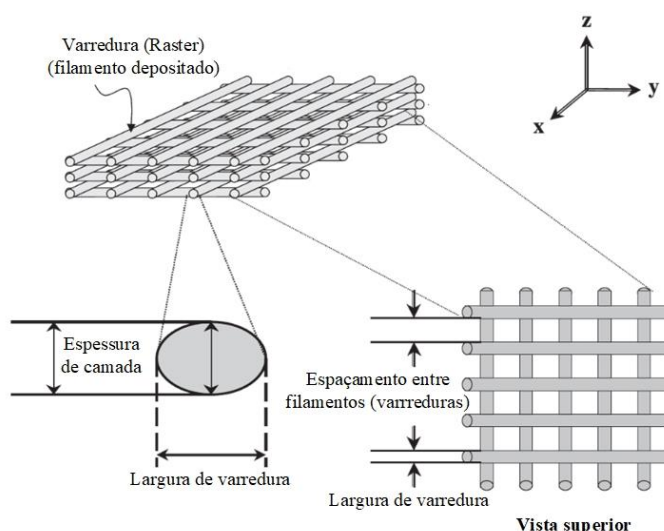


Figura 34 – Representação dos parâmetros de processo FDM (adaptado de KALITA *et al.*, 2003)<sup>11</sup>.

De acordo com Carneiro *et al.* (2015), uma regra indica que a espessura de camada deve ser ajustada em um valor inferior a 80% do diâmetro do bico. No entanto, a espessura de camada real produzida pode ser diferente do valor teórico configurado, em função do inchamento do extrudado, nivelamento da plataforma de construção, ou preenchimento excessivo (PFEIFER *et al.*, 2016).

Quanto menor for a espessura de camada, mais fina é a resolução que pode ser alcançada na impressão (SAYBOLT, 2015). Uma menor altura de camada proporciona uma superfície com aparência mais suave (menor rugosidade), mas aumenta o tempo de impressão, isto é, de

<sup>11</sup> Ressalta-se que o termo “varredura” — do inglês *raster* — está relacionado ao filamento depositado, resultante da extrusão (BRANDÃO e SANT’ANNA, 2005).

construção. Menores espessuras auxiliam também no melhoramento da adesão entre camadas, pois aumentam o contato superficial entre os filamentos depositados, beneficiando os mecanismos de transferência de calor, e colaborando para o crescimento do pescoço entre os mesmos — Figura 35 (a). Alternativamente, uma espessura de camada maior reduz o tempo de fabricação e a impressão apresentará linhas horizontais mais perceptíveis, em cada uma das camadas depositadas, favorecendo ao aparecimento do efeito escada (SOOD *et al.*, 2012; EVANS, 2012; WU *et al.*, 2017; GOMEZ-GRAS *et al.*, 2018). Na Figura 35 é demonstrada a diferença entre um mesmo objeto confeccionado com duas espessuras distintas, de 0,3 mm em (b) e 0,15 mm em (c) (EVANS, 2012).

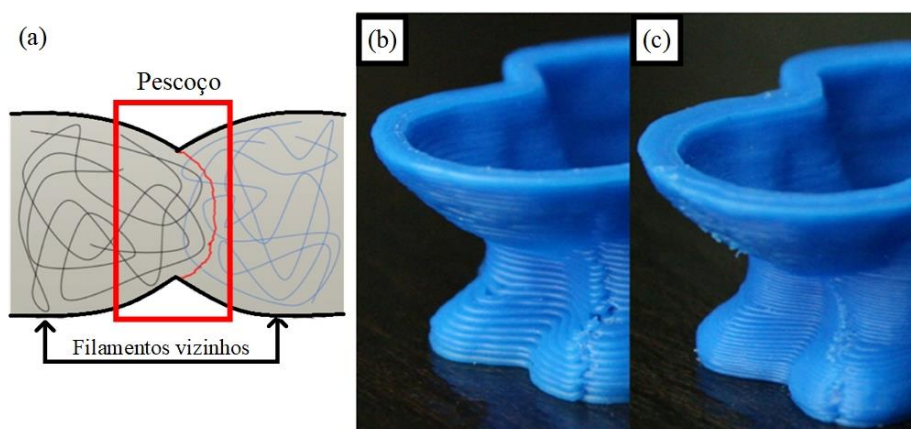


Figura 35 – Pescoço (a) (adaptado de BÄHR e WESTKÄMPER, 2018) e espessura de camada e qualidade da superfície, (b) 0,3 mm e (c) 0,15 mm (adaptado de EVANS, 2012).

Retomando os parâmetros representados na Figura 34, a largura de varredura consiste na largura dos cordões utilizados nas camadas. Maiores valores tendem a construir uma peça com interior mais sólido. Este parâmetro varia de acordo com o tamanho do bico (MOHAMED *et al.*, 2015; GOH *et al.*, 2019). Tipicamente, a largura de varredura é definida com valores entre 1,2 e 1,5 vezes maiores que o diâmetro do bico, uma vez que quando o filamento é depositado e solidifica, o material flui em certa quantidade em direções perpendiculares à direção de deposição (AGARWALA *et al.*, 1996). Variar a espessura de camada, muito provavelmente, teria o mesmo efeito da variação da largura dos filamentos depositados (NANCHARAI AH *et al.*, 2010).

Ainda em relação aos parâmetros esquematicamente ilustrados na Figura 34, o espaçamento entre os filamentos depositados (*air gap*) refere-se à folga entre estes dentro de uma mesma camada (MOHAMED *et al.*, 2015; PATHADE E KULKARNI, 2016). Geralmente, isto é, por padrão, um valor igual a zero é atribuído a este parâmetro, de forma a



garantir que os filamentos depositados apenas se toquem. A aplicação de um valor positivo significa que as varreduras estarão distantes umas das outras. No outro sentido, ou seja, o uso de um valor negativo, indica que os filamentos depositados irão se sobrepor, resultando em uma estrutura mais densa e com maior tempo de construção (AHN *et al.*, 2002; VOLPATO *et al.*, 2017).

O ângulo de varredura — Figura 36 (a) — consiste no ângulo entre o eixo X da plataforma de construção e as varreduras (SOOD *et al.*, 2012; KAVEH *et al.*, 2015). Wu *et al.* (2015) o definem como a orientação das varreduras em respeito à direção de carregamento dos esforços. O ajuste deste parâmetro afeta a precisão de forma e as propriedades mecânicas das peças impressas, podendo ser configurado em valores entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  (WU *et al.*, 2017).

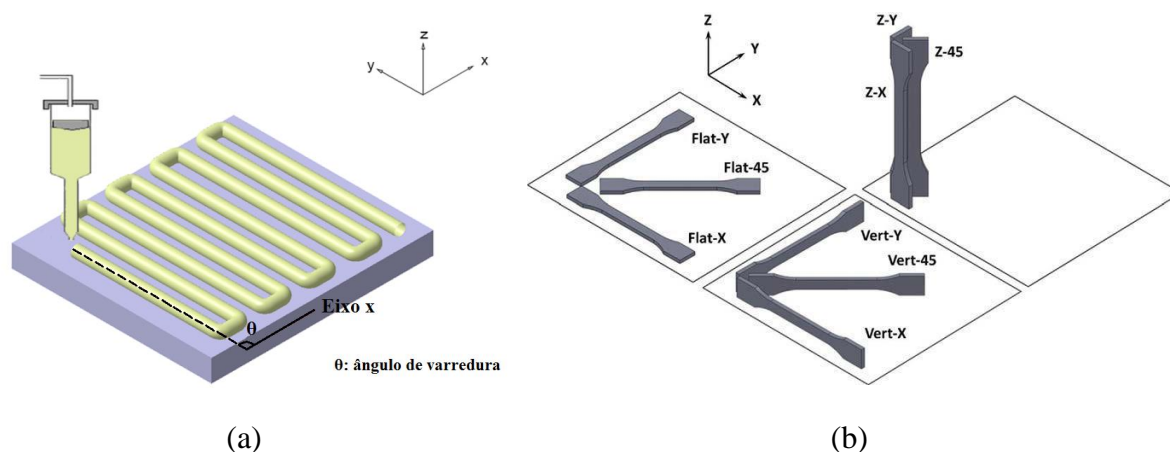


Figura 36 – Ângulo de varredura (a) (adaptado de WU *et al.*, 2015), orientações de construção (LEE e HUANG, 2013).

Seguindo com a apresentação dos parâmetros de processo, a orientação de construção é a definição de como a peça é posicionada quando fabricada — Figura 36 (b). Tal posicionamento é determinado em relação aos eixos X, Y e Z da plataforma de construção, sendo X e Y os eixos paralelos à plataforma e Z o eixo orientado na direção de construção das peças (SOOD *et al.*, 2012; RAYEGANI e ONWUBOLU, 2014).

A orientação de construção é um importante parâmetro a se considerar para o tempo de impressão e as propriedades das peças impressas. A direção como a peça é orientada muda a forma como a máquina imprime a peça, bem como os materiais de suporte, conforme mostrado na Figura 37 (DECICCO, 2013).

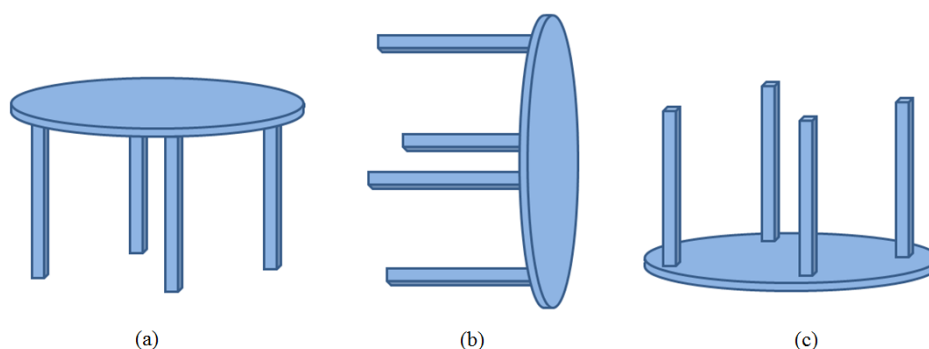


Figura 37 – Exemplo de diferentes orientações de construção (adaptado de DECICCO, 2013).

A orientação utilizada para a construção da mesa na Figura 37 (a) exige uma grande quantidade de material de suporte para a fabricação da parte superior, enquanto que na Figura 37 (b) o material de suporte será utilizado nos pés da mesa. Porém, se a mesa for orientada conforme a Figura 37 (c) — orientação vertical —, o equipamento FDM é capaz de imprimir toda a peça sem a necessidade de material de suporte. Usando este tipo de planejamento pode-se poupar uma quantidade considerável do tempo de fabricação (DECICCO, 2013). O autor alerta, no entanto, que peças construídas na orientação vertical são vulneráveis a esforços de tração devido à delaminação e, portanto, a posição de construção deve ser avaliada quando se deseja construir uma peça para aplicação final e que esteja sujeita ao tipo de solicitação descrita.

Relativamente à variável número de contornos (*number of countours*), esta caracteriza-se pelo número de perímetros fabricados, internos e externos, em torno da peça (DOMINGO-ESPIN *et al.*, 2014) (Figura 38).

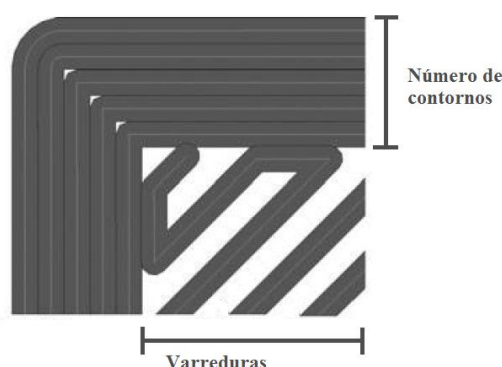


Figura 38 – Representação do número de contornos (adaptado de DOMINGO-ESPIN *et al.*, 2014).

Além dos parâmetros de processos apresentados anteriormente, outros como as temperaturas de extrusão e de envelope — isto é, as temperaturas ajustadas no sistema de extrusão e na câmara de construção da máquina — são muito importantes na tecnologia FDM



(MAGALHÃES, 2010). A temperatura de extrusão afeta a viscosidade do material. Uma temperatura demasiadamente baixa faz com que o material não possa fluir corretamente ao longo do bico e, desta forma, as camadas não fundem de forma apropriada, podendo gerar um efeito de delaminação ou separação das camadas. Por outro lado, se a temperatura for muito elevada, o material perde a capacidade de arrefecer adequadamente entre as camadas, prejudicando a impressão. Temperaturas altas, acima de um limite máximo, degradam o material, gerando um aspecto de queimado (RIVA, 2013; RIDOLFI, 2014).

A temperatura de envelope, por sua vez, tem uma importante função de reduzir as deformações nas peças fabricadas por FDM, uma vez que propicia o relaxamento das tensões dos filamentos depositados, geradas principalmente pelos gradientes, ou variações, de temperatura durante a construção. Colabora também para a adesão entre as estruturas depositadas. Tal parâmetro é ajustado de acordo com o material utilizado (YUAN, 2008; VOLPATO *et al.*, 2017). No caso das máquinas de baixo custo, corresponde à temperatura da base de impressão, que atua de forma a controlar as taxas de resfriamento dos filamentos extrudados e a adesão nas primeiras camadas, além de limitar os efeitos de contração dos materiais, e prevenir o empenamento das peças (BRISCHETTO *et al.*, 2018; GOH *et al.*, 2019).

Seguindo com a apresentação dos parâmetros de processo, outra importante variável é a velocidade de impressão (*print speed*), que consiste na velocidade linear de movimento do bico durante a construção de uma peça (STEPHEN *et al.*, 2013; AKANDE, 2015; YANG *et al.*, 2019). Segundo Chua *et al.* (2010) um dos motivos para o processo FDM ser lento está relacionado ao fato de que a velocidade de construção é limitada pela taxa de extrusão, ou fluxo de material, no cabeçote extrusor.

Assim como os demais parâmetros, a velocidade de impressão também afeta a qualidade dos resultados obtidos. Altas velocidade tendem a gerar baixa qualidade de impressão e menor tempo de fabricação. No outro sentido, baixas velocidades aumentam a qualidade e o tempo de impressão. A velocidade de impressão deve ser configurada, adequadamente, em função do fluxo de material (RIDOLFI, 2014). Velocidades de deslocamento altas devem ser combinadas com um fluxo de material elevado, para compensar o efeito de “impressão magra”<sup>12</sup> devido ao alongamento do filamento depositado (RIVA, 2013). No entanto, se a velocidade for muito baixa, a área de impressão será sobrecarregada (PFEIFER *et al.*, 2016).

---

<sup>12</sup> Trecho original, em italiano, de Riva (2013):

“Velocità alta va combinata con flow alto per compensare l’effetto “stampa magra” dovuto allo stiramento del filo” (RIVA, 2013, p. 79).

O percentual de preenchimento, ou densidade de preenchimento (*fill density* ou *density*), define a quantidade de material no interior da peça (Figura 39). Um valor referente a 100% significa que a densidade de material no interior do componente é máxima, enquanto um percentual igual a 0 corresponde a uma peça oca. A densidade de preenchimento é um parâmetro que deve ser ajustado de acordo com a aplicação da peça a ser fabricada. Preenchimentos mais espaçados são impressos muito mais rápido do que em peças mais densas, porém a resistência tende a diminuir (BRATL, 2013; DECICCO, 2013).

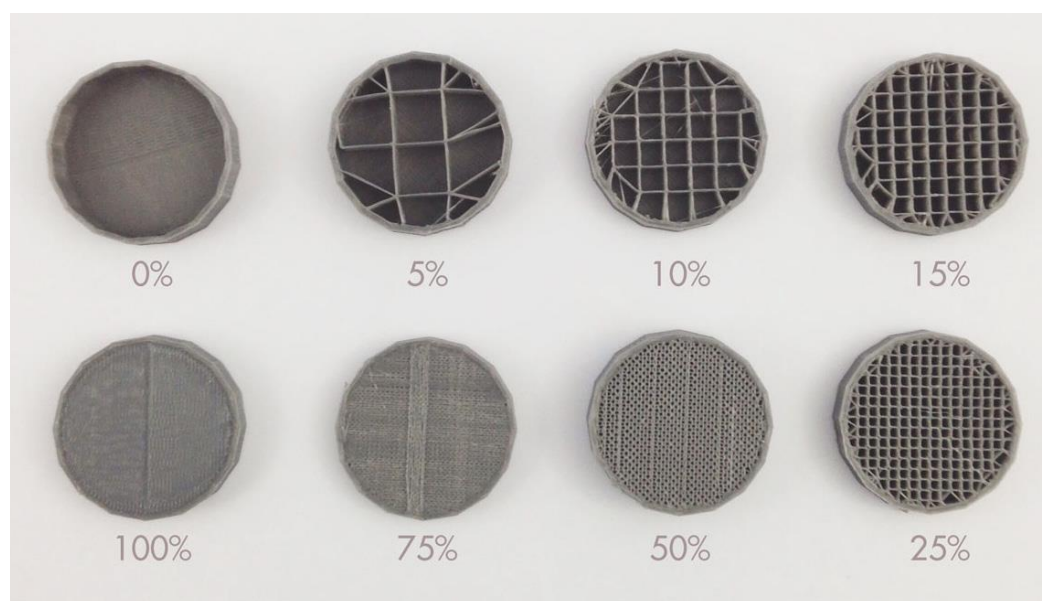


Figura 39 – Variação do percentual de preenchimento (adaptado de RIVA, 2013).

Um parâmetro importante, ainda pouco explorado na literatura, é o multiplicador de extrusão. O ajuste dessa variável afeta, por exemplo, a qualidade dimensional, das superfícies, mecânica e a porosidade das peças impressas. É responsável por controlar o fluxo de material mediante a gestão do volume de extrudado, por unidade de tempo e distância percorrida, através do cabeçote de impressão. Por padrão, é definido como 1. Valores acima do citado geram peças mais densas, entretanto, se muito elevados, podem causar excesso de deposição de material, impactando em distorções dimensionais. No outro sentido, isto é, configurações menores que 1, podem resultar em peças impressas com quantidades de material inferiores à necessária para se obter boas propriedades mecânicas (ĆWIKŁA *et al.*, 2017; GORDEEV *et al.*, 2018).

Por fim, são apresentados conceitos sobre as estratégias de deposição, as quais desempenham um papel importante em processos baseados em deposição (KULKARNI e DUTTA, 1999). Na modelagem por fusão e deposição, cada camada inicia com a construção de um perímetro (perfil), correspondente à secção transversal da peça. Cada perfil é um

contorno fechado, no qual os pontos inicial e final são coincidentes. Após concluir a fabricação do perímetro, inicia-se o preenchimento da peça, que pode ser realizado, comumente, de três formas (AGARWALA *et al.*, 1996; KULKARNI e DUTTA, 1999; LIMA, 2009; VOLPATO *et al.*, 2017):

- a) *raster*: o material é depositado em um estilo zig-zag, com os filamentos paralelos entre si (Figura 40, a);
- b) *contour*: o preenchimento interno é baseado em vários ciclos equidistantes, de acordo com o perímetro ou perfil da peça (Figura 40, b);
- c) *contour e raster*: combinação das duas estratégias e cada camada (Figura 40, c).

A estratégia *raster* permite o uso de maiores velocidades, além de ter a capacidade de mudar a direção de movimento das varreduras em camadas adjacentes. Tipicamente a direção de *raster* é alternada em 90° de uma camada em relação à outra, buscando garantir maior resistência mecânica às peças — Figura 40 (d) (AGARWALA *et al.*, 1996; VOLPATO *et al.*, 2005; VOLPATO *et al.*, 2007; WU *et al.*, 2017).

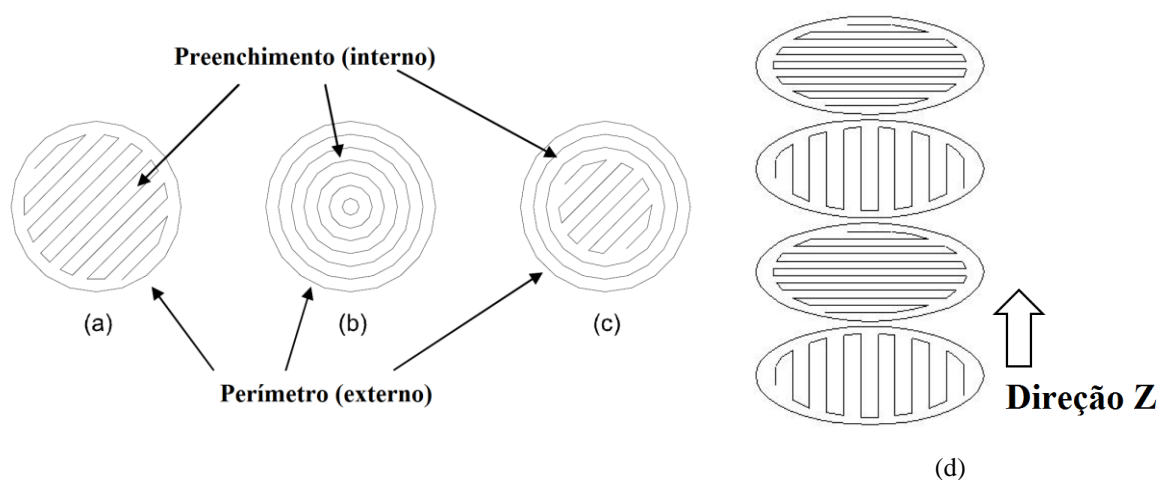


Figura 40 – Estratégias de deposição, (a) *raster*, (b) *contour*, (c) *countor e raster* (adaptado de VOLPATO *et al.*, 2005), camadas alternadas (d) (adaptado de VOLPATO *et al.*, 2007).

Nos *softwares* de fatiamento *open source* como o Slic3r, diferentes estratégias de deposição encontram-se disponíveis, segundo Andersen (2015): retilínea (*rectilinear*), linear, concêntrica (*concentric*), favo de mel (*honeycomb*), acordes de Arquimedes (*Archimedean Chords*), curvas de Hilbert (*Hilbert curve*), e octagrama espiral (*octagram spiral*), Figura 41.

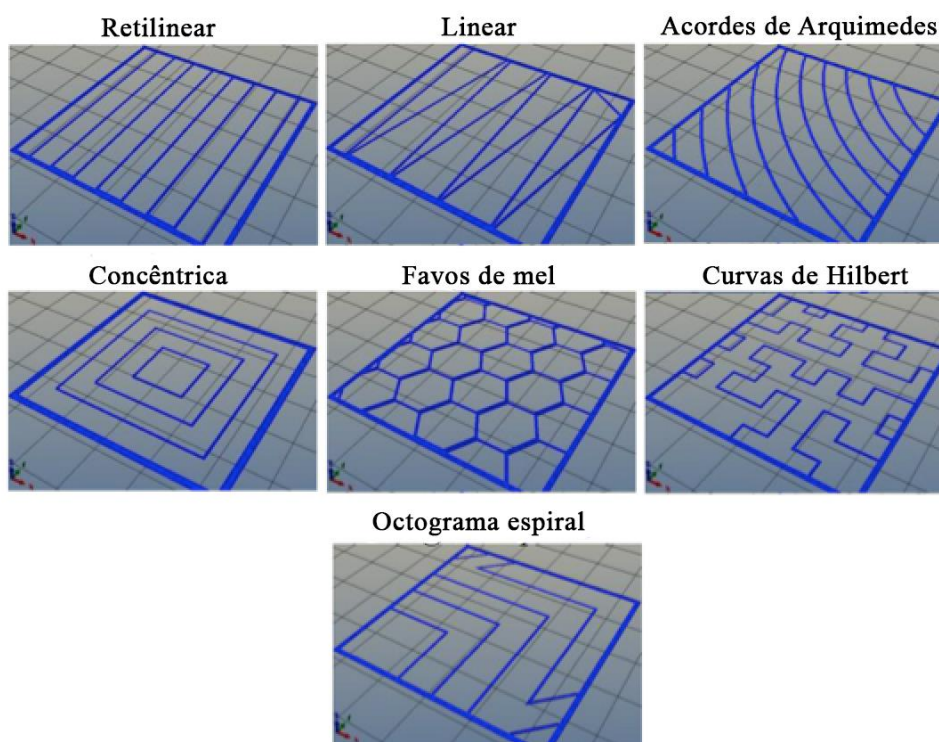


Figura 41 – Estratégias de deposição, *Slic3r* (adaptado de ANDERSEN, 2015).

### 2.4.3 Aspectos de qualidade das peças produzidas por FDM

#### 2.4.3.1 Dimensional

O uso das impressoras 3D na fabricação de peças funcionais já é uma realidade atualmente. Entretanto, um dos principais desafios para aumentar o percentual de produtos finais produzidos por tais sistemas, é a sua baixa precisão dimensional, quando comparada a tecnologias subtrativas (torneamento, fresamento, furação, entre outras) (YAMAN, 2018). Essa condição se faz presente nas máquinas de baixo custo baseadas em extrusão, decorrentes de limitações relacionadas à otimização mecânica e de *software* dos equipamentos, decepcionando, em especial, os usuários sem conhecimento em engenharia (MINETOLA e GALATI, 2018; RAMLI *et al.*, 2018).

A precisão dimensional e a resolução das peças fabricadas por Manufatura Aditiva baseada em extrusão é dependente dos parâmetros de processo e projeto do produto, bem como das propriedades do material de construção (filamento). Basicamente a resolução do processo é uma função de fatores como a precisão dos motores que controlam os movimentos do

cabeçote extrusor, da qualidade do algoritmo de controle e do diâmetro do bico de impressão (TURNER e GOLD, 2015).

Especificamente no processo de MA por extrusão, os parâmetros de processo relativos às trajetórias são muito influentes na precisão dimensional, especialmente a espessura de camada (SOOD *et al.*, 2009; TURNER e GOLD, 2015). De acordo com Nancharaiah *et al.* (2010), quanto menor a espessura de camada, maior a precisão dimensional. Além de menores espessuras, os autores ressaltam que o uso de uma largura de varredura moderada aumenta a precisão dimensional, enquanto que *air gaps* negativos podem afetar negativamente a qualidade das tolerâncias. Outras variáveis como temperatura de extrusão, velocidade de impressão, fluxo de material, ângulo de varredura, estratégia de deposição, entre outras, influenciam nas dimensões das peças impressas (LANZOTTI *et al.*, 2015b; EQUBAL *et al.*, 2017; POLAK *et al.*, 2017; RAHMAN *et al.*, 2018).

Galantucci *et al.* (2015) alertam ainda que a precisão dimensional em peças fabricadas por FDM pode ser afetada por fatores como: variações na geometria dos filamentos depositados em relação à forma teórica cilíndrica; valores elevados de espessura de camada geraram distorções nos filamentos depositados, podendo estar relacionado ao aumento do volume de material extrudado; efeitos da contração do material; e problemas de adesão do material a plataforma de construção, na primeira camada. Ressalta-se ainda que os efeitos anteriormente citados atuavam em conjunto com os parâmetros de processo: tipo de bico, espessura de camada, largura de varredura e velocidade de impressão.

As propriedades geométricas dos componentes impressos são afetadas pelas características reológicas e pela contração dos materiais (BÄHR E WESTKÄMPER, 2018). Segundo Valerga *et al.* (2018), uma maior fluidez do material, a temperaturas altas, faz com que os elementos impressos aumentem suas dimensões ao longo dos eixos XY e diminuam em Z. Os autores ressaltam, ainda, que efeitos como a formação de bolhas durante a extrusão do material influenciam nas medidas dos componentes fabricados.

No processo FDM, o material extrudado a uma determinada temperatura de processamento resfria devido ao grande gradiente térmico do ar circundante. O fenômeno descrito gera contração térmica (encolhimento), que pode ser prevenida pela plataforma de suporte, e se caracteriza pela presença de tensões de tração e compressão ao longo de toda a peça fabricada. Ao final da construção, o componente é removido da plataforma de construção, aliviando as tensões, o que causa o empenamento na direção oposta as ações de suporte (ARMILLOTTA *et al.*, 2018), Figura 42 (a) e (b). Além da precisão dimensional das peças, as tensões internas da contração dos filamentos provocam deformações nos produtos obtidos,

como: delaminação entre camadas, ou até mesmo fissuras (WANG *et al.*, 2007). Quando o empenamento ocorre, a altura total da peça é reduzida, porque as camadas inferiores são deformadas, enquanto as camadas superiores continuam sendo construídas (GUERRERO-DE-MIER *et al.*, 2015).

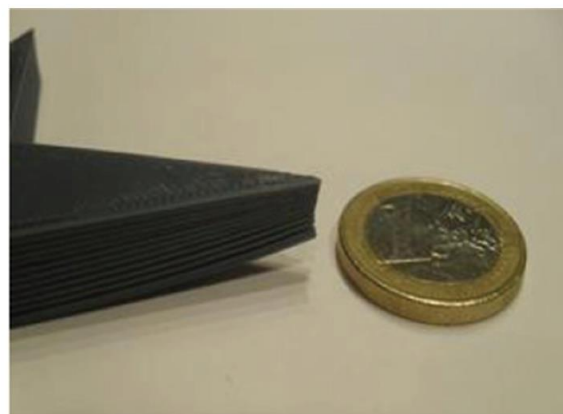
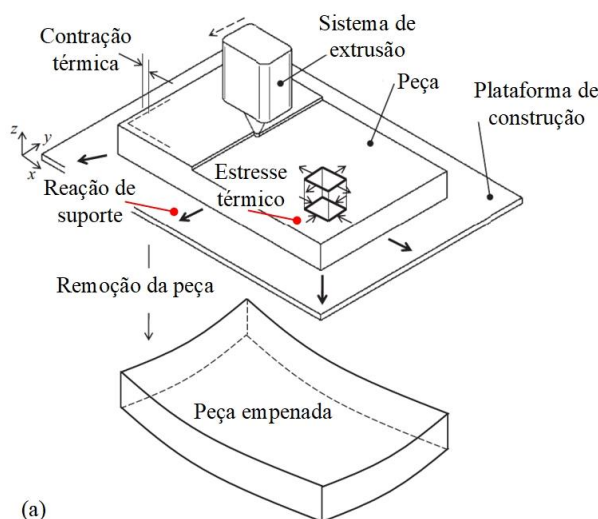


Figura 42 – Fenômenos térmicos (a) (adaptado ARMILLOTTA *et al.*, 2018) e peça empenada (b) (adaptado de GUERRERO-DE-MIER *et al.*, 2015).

#### 2.4.3.2 Acabamento das superfícies geradas

O aspecto rugoso, áspero, é inevitável em superfícies finais obtidas por métodos de produção baseados em camadas e se faz presente em diferentes áreas que utilizam a tecnologia FDM. A rugosidade afeta propriedades funcionais dos materiais — ópticas, comportamento do atrito, transferência de calor, propriedades mecânicas, entre outras — o que faz com que requisitos de controle das superfícies de produtos fabricados por MA aumente (VAHABLI e RAHMATI, 2016).

A qualidade das superfícies geradas no processo FDM é afetada pelos parâmetros de processo e também pelo efeito escada (Figura 43). Este último é uma característica inerente dos processos de fabricação por camadas e consiste em um desvio entre a geometria determinada no modelo CAD e a construída. É identificado principalmente ao longo de superfícies inclinadas das peças, planas ou não, ao longo do eixo Z de construção, tornando-se pior à medida que esta inclinação aumenta. Tal efeito não pode ser eliminado completamente, porém, há como ser reduzido, aprimorando as configurações de parâmetros de processo ou adotando técnicas de pós-processamento (GARG *et al.*, 2016; VOLPATO *et al.*, 2017).



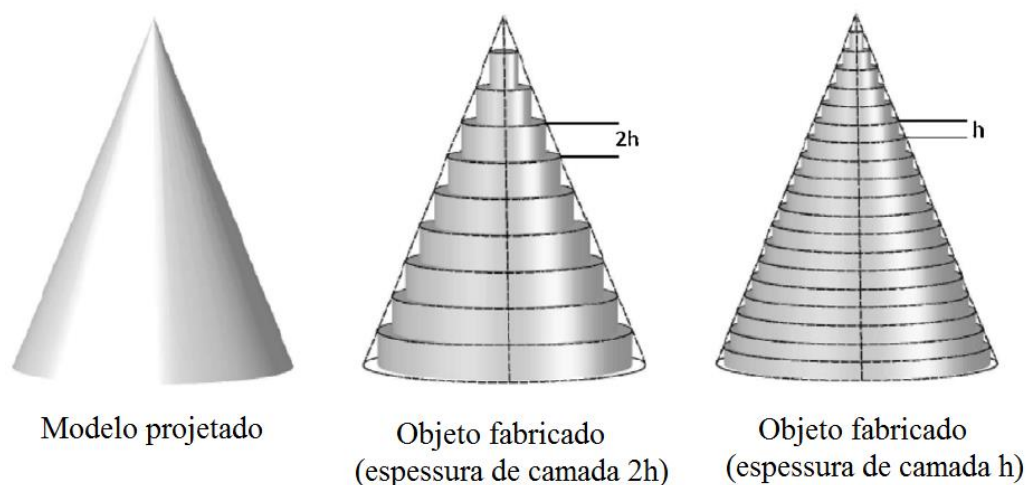


Figura 43 – Efeito escada e variação da espessura de camada (adaptado de QUAN *et al.*, 2015).

Relativamente aos parâmetros de processo, a espessura de camada e a orientação de construção (ou das superfícies) são fatores significativos na qualidade das superfícies geradas por FDM (VASUDEVARAO *et al.*, 2000). Em geral, superfícies horizontais, isto é, paralelas ao plano de construção, são mais suaves do que verticais, ortogonais ao plano de construção (AHN *et al.*, 2009; BAKAR *et al.*, 2010; TURNER e GOLD, 2015). A escolha de uma orientação de construção ótima reduz também a necessidade de materiais de suporte, diminuindo o tempo de fabricação e melhorando o aspecto das superfícies. Por fim, o uso de espessuras de camada pequenas aumenta a qualidade das superfícies e reduz o efeito escada, (KUMAR *et al.*, 2014; VOLPATO *et al.*, 2017), aumentando, no entanto, o tempo de construção (TURNER e GOLD, 2015).

#### 2.4.3.3 Comportamento mecânico

As propriedades mecânicas de produtos fabricados por FDM estão fortemente relacionadas aos parâmetros de construção das camadas, principalmente ao mais importante, a orientação de construção. O plano da plataforma de construção é o plano de fatiamento que define como um elemento é dividido em camadas. Consequentemente, diferentes orientações vão resultar em diferentes arranjos de camada. A resistência dos produtos é menor em regiões onde o material é unido, principalmente nas divisões entre camadas (ao longo do eixo Z), resultando assim em propriedades mecânicas anisotrópicas (GÓRSKI *et al.*, 2015a; AHN *et al.*, 2002; VOLPATO *et al.*, 2017).

Volpato *et al.* (2017) apresentam um exemplo simples para explicar a anisotropia. Considerando um cilindro impresso em duas orientações, vertical e horizontal — Figura 44 (a) e (b), respectivamente —, e a aplicação de uma força nas direções perpendicular e de adição das camadas, o efeito seria a menor resistência à flexão, devido à delaminação, na peça fabricada em (a), quando comparada ao elemento em (b).

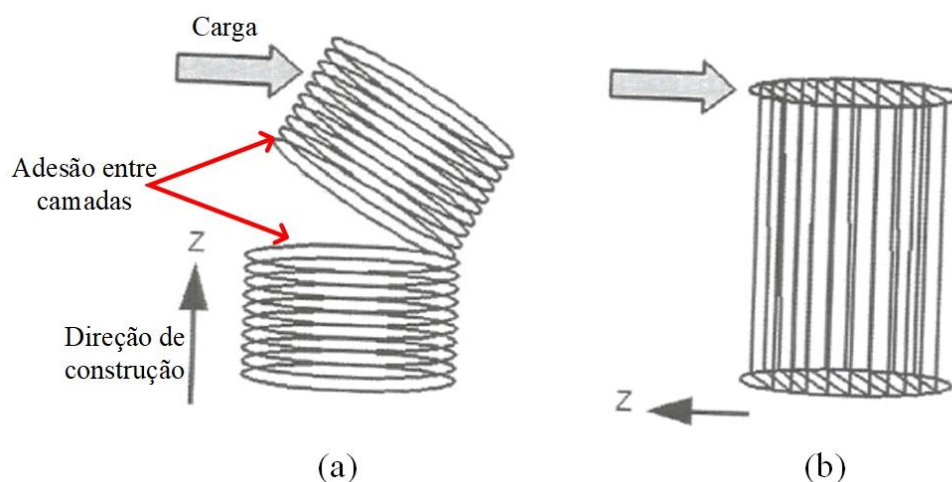


Figura 44 – Anisotropia, efeitos da aplicação de uma carga em peças impressas na vertical (a) e horizontal (b) (adaptado de VOLPATO *et al.*, 2017).

Segundo Rodriguez *et al.* (2000) a mesoestrutura de peças obtidas por FDM é formada por uma densidade de vazios e pela presença de conexões filamento-filamento, entre e dentro das camadas (Figura 45). Para os autores, a geometria dos vazios e a extensão da união entre os filamentos individuais são fatores importantes na determinação da anisotropia e da magnitude da resistência das peças fabricadas.

Ainda de acordo com os autores, a melhor condição para uma peça em FDM seria reduzir a densidade de vazios e aumentar a densidade de união entre os filamentos, produzindo assim melhores propriedades mecânicas. Em seu estudo, os autores identificaram que uma mesoestrutura com configuração desalinhada fornece maior resistência às peças do que uma configuração alinhada — ajuste relacionado à translação das camadas —, justamente porque reduz a densidade de vazios, conforme mostrado na comparação da Figura 46 (a) e (b).



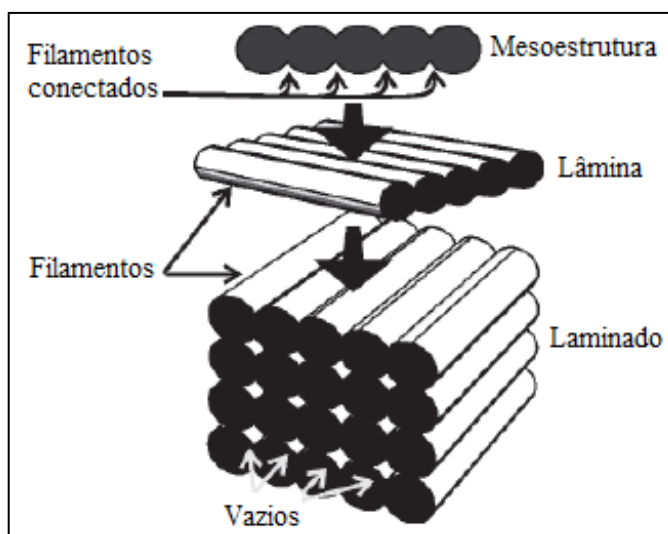


Figura 45 – Composição de uma peça fabricada por FDM (adaptado de BELLEHUMEUR *et al.*, 2004 por SANTANA, 2015).

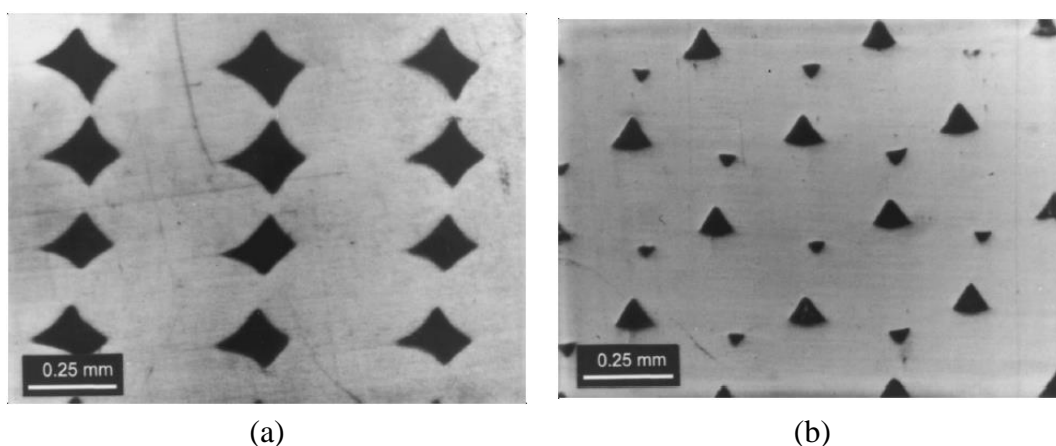


Figura 46 – Configurações alinhada (a) e desalinhada (b) (adaptado de RODRIGUEZ *et al.*, 2000).

Em síntese, a resistência mecânica em peças fabricadas por FDM será sempre menor do que a resistência de um produto de mesma geometria, mas com uma estrutura monolítica — como as obtidas pelo processo de moldagem por injeção. Tal aspecto está relacionado ao erro de volume, em forma de “aberturas de ar”, que ocorre no interior dos elementos construídos (GÓRSKI *et al.*, 2012 *apud* GÓRSKI *et al.*, 2015a). De acordo com Górski *et al.* (2015b), mesmo se o efeito de fraca união entre as camadas for reduzido ao mínimo, o erro de volume torna a área efetiva de carga menor do que nas peças injetadas, o que aumenta os esforços globais e reduz a resistência.

Outros aspectos importantes para a determinação das propriedades mecânicas nas peças fabricadas pelo processo de impressão 3D por extrusão são o crescimento do pescoço, a interdifusão e a randomização das cadeias poliméricas na interface entre filamentos adjacentes

(SUN *et al.*, 2008; SINGH *et al.*, 2019). Após a deposição, os filamentos vizinhos se unem por um processo de molhamento. Por condução e radiação, o calor é transferido do material mais quente para o mais frio. A estrutura já solidificada da porção fria amolece parcialmente, formando um pescoço. Movimentos Brownianos<sup>13</sup> e a convecção de calor fazem com que as cadeias poliméricas se difundam através da interface, em um fenômeno denominado sinterização. A difusão molecular ocorre acima da temperatura crítica de sinterização. Diminuindo a temperatura, aumenta-se a viscosidade, o que diminui a quantidade de cadeias poliméricas difundindo ao longo da interface (BÄHR e WESTKÄMPER, 2018) — Figura 47.

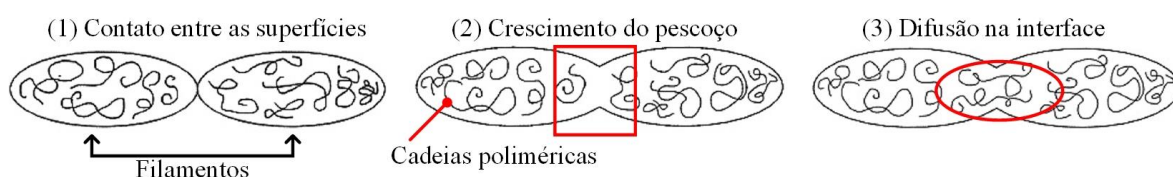


Figura 47 – Processo de união entre filamentos depositados (adaptado de FITZHARRIS *et al.*, 2018)

Ligações, assim como juntas soldadas, representam pontos de baixa resistência dos componentes. As propriedades mecânicas, portanto, dependem da quantidade de cadeias poliméricas difundidas (BÄHR e WESTKÄMPER, 2018). Relativamente aos parâmetros de processo, as propriedades mecânicas das peças são influenciadas por muitos fatores, tais como: espessura de camada, ângulo de varredura, orientação de construção, estratégia de preenchimento, espaçamento entre os filamentos depositados (*air gap*) e temperatura de extrusão (WU *et al.*, 2015). A fim de resumir as principais variáveis estudadas na literatura, foram selecionados alguns estudos e, a partir destes, elaborado o Quadro 4.

Quadro 4 – Parâmetros de processo avaliados em estudos sobre propriedades mecânicas.

Autor (s)	OC	EC	LV	ÂV	AG	VI	PP	EP	NC	TE
Ahn <i>et al.</i> (2002)			*	*	*					*
Sood <i>et al.</i> (2010)	*	*	*	*	*					
Stephen <i>et al.</i> (2013)	*	*				*	*	*		
Lužanin <i>et al.</i> (2014)		*		*			*			
Onwubolu e Rayegani (2014)	*	*	*	*	*					
Tymrak <i>et al.</i> (2014)		*		*			*			
Lanzotti <i>et al.</i> (2015a)		*		*					*	
Wu <i>et al.</i> (2015)		*		*						

Continua

<sup>13</sup> Movimentos Brownianos são movimentações aleatórias de partículas em um fluido, causadas por colisões destas com outros átomos ou moléculas do meio (HELMENSTINE, 2019).

Quadro 4 – Parâmetros de processo avaliados em estudos sobre propriedades mecânicas  
(Continuação).

Dawoud <i>et al.</i> (2016)				*	*					
Christiyan <i>et al.</i> (2016)		*				*				
Mohamed <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	*				*	
Page <i>et al.</i> (2017)		*					*		*	
Sabino Netto <i>et al.</i> (2017)	*			*			*			
Ipekçi <i>et al.</i> (2018)							*			
Nota: Orientação de construção (OC), espessura de camada (EC), largura de varredura (LV), ângulo de varredura (ÂV), <i>air gap</i> (AG), velocidade de impressão (VI), percentual de preenchimento (PP), estratégia de preenchimento (EP), número de contornos (NC), temperatura de extrusão (TE).										

## 2.5 MATERIAIS

### 2.5.1 Materiais: *snap-fits*

As propriedades dos materiais têm grande influência no projeto e no desempenho de sistemas *snap-fit*. Os materiais utilizados devem apresentar alta resistência à fratura por estresse, especialmente em ambientes químicos. Além de atender os fatores mencionados anteriormente, os materiais — devido ao fato deste tipo de junta ser aplicado a superfícies que estão à mostra — devem oferecer propriedades que satisfaçam fatores estéticos. Polímeros podem ser, em geral, caracterizados como materiais rígidos ou flexíveis, e dependendo da aplicação, ambas as características podem ser desejadas para *snap-fits* (TROUGHTON, 2008; TRES, 2014).

Para Bonenberger (2005), muitas vezes um material é selecionado para uma determinada aplicação com base na aparência e em requisitos funcionais. Segundo o autor, no caso da determinação do desempenho dos *snap-fits*, tais requisitos não são as considerações primordiais. O *snap-fit* deve ser feito para funcionar com o material determinado. Uma reflexão sobre os materiais vai ajudar o projetista a antecipar potenciais dificuldades que serão enfrentadas de forma prévia à fase de desenvolvimento, podendo questioná-las ao especialista responsável. No Quadro 5 é apresentado um resumo das propriedades desejáveis para materiais para aplicação em *snap-fit*.

Quadro 5 – Propriedades desejáveis em materiais para *snap-fits* (adaptado de LEE, 2009; TROUGHTON, 2008; TRES, 2014).

Propriedade	Descrição
Retenção de ultravioleta (UV)	Manter: <ul style="list-style-type: none"> <li>• qualidade estética;</li> <li>• propriedades mecânicas (evitar quebra ao longo do tempo).</li> </ul>
Moldagem a cor	Aditivos reduzem as propriedades dos polímeros (cádmio – vermelho).
Capacidade de ser pintado	Evitar o ataque ao polímero.
Extremos térmicos	Expansão ou contração mediante a variação térmica.
Resistência à propagação de trincas	Baixa propagação de trincas é desejável.
Resistência química	No caso de aplicações em automóveis, os componentes estão sujeitos a respingos de óleo, anticongelantes, entre outros.
Módulo de elasticidade	Afeta o grau de rigidez e determina a firmeza dos conjuntos montados.
Alongamento e resistência à tração	Se um componente <i>snap</i> é excessivamente defletido, o mesmo pode quebrar ou deformar permanentemente, impactando assim na manutenção da montagem dos componentes.
Coeficiente de atrito	Determina o quão fácil ou difícil será o processo de montagem e desmontagem de um sistema <i>snap-fit</i> .
Resistência à fadiga	Representa a capacidade de um material de resistir a um determinado nível de carga repetitiva (ou esforço cíclico), até o ponto de falha por fadiga (número de ciclos até a quebra).
Fluência e esforço de relaxamento	A fluência é o fenômeno mais estudado e documentado nos plásticos. Consiste em um aumento de deformação com o tempo para um polímero submetido a uma carga (tensão) e temperatura (23°C, por exemplo) constante. É muito importante neste tipo de material, devido a sua elevada sensibilidade à temperatura (SILVA <i>et al.</i> , 2013). A deformação de fluência não é recuperável. Conectores <i>snap-fit</i> são geralmente submetidos a deformações elásticas durante a montagem e o retorno ao seu estado livre de esforços.
Fluência e esforço de relaxamento	A força de montagem em <i>snap-fits</i> pode ser prevista com base nas propriedades de “esforço-relaxamento” de um material plástico. A realização de um teste de esforço de relaxamento em um plástico permite a previsão da quantidade de decadência de aperto. Quando a estimativa do comportamento de esforço-relaxamento não é possível de ser obtida, a fluência pode ser usada como diretriz: fluência mais alta, esforço-relaxamento mais rápido.

## 2.5.2 Filamentos FDM

Dentre os principais materiais utilizados em impressoras 3D FDM estão o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e o PLA (Poli Ácido Lático) (TORRES *et al.*, 2015). No entanto, outras opções encontram-se disponíveis, tais como: *LAYWOO-D3* (aparência de madeira), *LAYBRICK* (aparência de pedra), *MOLDLAY* (cera para positivos em *investment casting*), Nylon, Politereftalato de etileno (Politereftalato de etileno – PET), Policarbonato (Policarbonato – PC), HIPS (Poliestireno de alto impacto), POM (Polioximetileno), Poli Álcool Vinílico (Poli(vinil álcool) – PVA), TPE (Elastômero termoplástico), TPU (Poliuretano termoplástico), FPE (Poliéster flexível), entre outros (HAUSMAN e HORNE, 2014; HORVATH e CAMERON, 2015; ROHRINGER, 2019).

Além dos materiais anteriormente apresentados, estudos como os de Wu *et al.* (2014), Wu *et al.* (2015), e Yang *et al.* (2017) abordam o uso de materiais de alto desempenho, como o PEEK (Poli-éter-éter-cetona), no contexto da Manufatura Aditiva por extrusão. Nos tópicos a seguir, serão abordados conceitos mais específicos aos materiais utilizados nesta tese.

### 2.5.2.1 Poli Ácido Lático (PLA)

O Poli Ácido Lático consiste em um poliéster alifático, termoplástico compostável, semicristalino ou amorfo, obtido a partir de fontes renováveis como o açúcar de milho, batata e cana de açúcar, através de bioconversão e polimerização. Dispõe de características como biocompatibilidade, biodegradabilidade e absorção biológica, além de ser um material com boa aparência, alta resistência mecânica, baixa toxicidade, com boas propriedades de barreira<sup>14</sup> e processabilidade, estabilidade térmica e baixo impacto ambiental (CARRASCO *et al.*, 2010a; AFROSE *et al.*, 2016a; ARAÚJO *et al.*, 2015; CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; WU *et al.*, 2016; CEREGATTI *et al.*, 2017).

O material é utilizado em muitas indústrias, sobretudo em setores como a fabricação de implantes médicos biodegradáveis e embalagens para alimentos (ALSSABBAGH *et al.*, 2017). Entretanto, algumas deficiências do PLA, como a fragilidade inerente, um limitado alongamento até a ruptura e uma baixa resistência ao impacto constituem alguns desafios para a ampla aplicação do material (KUMAR *et al.*, 2010; BAI *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2017).

---

<sup>14</sup> Polímeros barreiras são utilizados em muitas aplicações de proteção e na área de embalagens (DELASSUS, 2002). No caso das embalagens, por exemplo, as características de barreira são intimamente relacionadas a estabilidade química, física, microbiológica e biológica dos produtos (CRUZ, 2013).

Para os entusiastas da Impressão 3D, as chamadas comunidades “*makers*”, o PLA caracteriza-se por ser um dos materiais mais populares, disponibilizado em várias cores e pela maioria dos fornecedores de suprimentos para a tecnologia, além de apresentar maior facilidade para imprimir quando comparado, por exemplo, ao ABS (BARNATT, 2014; TANIKELLA *et al.*, 2017). Comparativamente ao ABS, o PLA oferece melhores características termomecânicas, com maior resistência mecânica e um menor coeficiente de expansão térmica, o que melhora sua capacidade de impressão, reduzindo efeitos como o empenamento durante o processo de fabricação (CASAVOLA *et al.*, 2016; 2017). Um resumo das principais propriedades do PLA é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades do PLA de acordo com a literatura.

Propriedades	Valor	Referência
Temperatura de fusão (T <sub>m</sub> ) (°C)	170 a 180	PEREZ <i>et al.</i> , 2014;
Temperatura de transição vítrea (T <sub>g</sub> ) (°C)	55 a 65	MENG <i>et al.</i> , 2012;
		AHMED, 2017.
Coeficiente de expansão térmica <sup>15</sup> (μm/°C)		
30 – 50 °C	0,110	JI <i>et al.</i> , 2013
60 – 80 °C	0,227	
<b>Mecânicas</b>		
Módulo de elasticidade (GPa)	2,02 – 4,00	
Resistência à tração ( <i>yield</i> ) (MPa)	15,5 – 72	GARLOTTA, 2001;
		LANZOTTI <i>et al.</i> ,
Resistência à tração ( <i>break</i> ) (MPa)	14 – 70	2015a;
Deformação ( <i>yield</i> ) (%)	9,8 – 10	PROSPECTOR <sup>®</sup> ,
Deformação ( <i>break</i> ) (%)	0,50 – 9,2	[2016]; WANG <i>et al.</i> ,
Módulo de flexão (GPa)	2,392 – 4,930	2017.
Resistência à flexão (MPa)	48 – 110	
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,25	HENTON <i>et al.</i> ,
		2005, SANTANA <i>et al.</i> , 2016
Coeficiente de atrito	0,16 ± 0,02	BĚHÁLEK <i>et al.</i> , 2012

#### 2.5.2.2 Politereftalato de Etileno Glicol (PETG)

Atualmente um material que vem ganhando espaço entre os usuários da comunidade de Impressão 3D e produtores de filamentos é o PETG, sobretudo quando se há a necessidade de construir peças flexíveis e duráveis. Neste cenário, é anunciado como um filamento que reúne

<sup>15</sup> PLA puro (PLA, 2002D Grade, pellet form, NatureWorks™, USA) (JI *et al.*, 2013).

as melhores qualidades do ABS (resistente e dúctil) com a facilidade de impressão que o PLA oferece. Caracteriza-se por ser uma versão modificada do PET, na qual o “G” significa “glicol modificado”, sendo adicionado à composição do material durante a polimerização. O resultado deste processo é um filamento mais transparente, menos rígido e mais fácil de ser utilizado do que a sua forma base, o PET. O PETG, quimicamente descrito como *poly(ethylene terephthalate-co-1, 4-cyclohexylenedimethylene terephthalate)*, é um polímero amorfo, que mantém seu estado semissólido quando aquecido, o que o torna adequado para a Impressão 3D. É aplicado na produção de garrafas de água, embalagens de alimentos, entre outros itens de plástico (HORVATH e CAMERON, 2015; MATTERHACKERS, 2016; ALZAHRANI, 2017; LOCKER, 2016; 2019).

No contexto da Impressão 3D, comporta-se como um material de fácil impressão, normalmente com boa adesão entre as camadas, e com baixa tendência de empenamentos e contração nas peças fabricadas (LOCKER, 2016; 2019). Em um aspecto geral, o PETG consiste em um polímero com temperatura de transição vítrea próxima a 80°C, com propriedades mecânicas semelhantes às do PET, tendo como vantagens uma boa tenacidade, flexibilidade e elevada capacidade de processamento (WANG *et al.*, 2013). Na Tabela 6 são apresentadas as principais propriedades do PETG utilizado nos estudos — o qual apresenta composição química semelhante à citada anteriormente — de Moskala (1996), Zhang *et al.* (2000), Lam *et al.* (2004), Dupaix e Boyce (2005), Jodeh (2011), Dhotel *et al.* (2015). O material é produzido pela empresa EASTMAN®.

Tabela 6 – Propriedades do PETG 6763 da EASTMAN® (EASTMAN, 2016).

Propriedades	Valor
Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) (°C)	80
Coefficiente de expansão térmica ( $\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (mm/mm·°C))	5,1
<b>Mecânicas</b>	
Módulo de elasticidade (GPa)	2,10
Resistência à tração ( <i>yield</i> ) (MPa)	50
Resistência à tração ( <i>break</i> ) (MPa)	28
Deformação ( <i>break</i> ) (%)	130
Módulo de flexão (GPa)	2,10
Resistência à flexão ( <i>yield</i> ) (MPa)	70
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,27

Quanto ao coeficiente de atrito, Fujiwara *et al.* (2015) obtiveram valores experimentais em torno de  $0,149 \pm 0,037$  — para o PETG (Erkodur®), fornecido pela empresa Erkodent Erich

Kopp GmbH. Já a companhia Klöckner Pentaplast (2015) apresenta valores para o coeficiente de atrito do material em torno de 0,22.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS: LITERATURA

Ao fim da revisão da literatura foi possível melhorar a compreensão sobre as informações apresentadas no gráfico da Figura 1. Observou-se, no cenário da Manufatura Aditiva aplicada ao contexto científico, um importante movimento de autores com o objetivo de analisar as potencialidades de diferentes tecnologias na fabricação de *snap-fits* e, consequentemente, no âmbito da montagem. Entretanto, os principais estudos são baseados em técnicas de MA de alto valor, como SLS e *PolyJet*<sup>®</sup>, o que limita o acesso de um grande público, opondo-se, portanto, ao atual movimento da Impressão 3D motivado pelos sistemas de baixo custo e código aberto baseados em extrusão.

Neste último cenário constatou-se uma lacuna na literatura sobre estudos dedicados ao desenvolvimento específico de conexões *snap-fit*, incentivando assim as atividades dos próximos capítulos desta tese de doutorado. A bibliografia indicou ainda a prioridade em resolver questões relevantes à tecnologia de Impressão 3D mencionada e que afetam o desempenho de *snap-fits*, como os efeitos de delaminação entre camadas e de acabamento das superfícies. Estes podem ser melhorados com uma boa parametrização (com atenção à orientação de construção) e com a escolha de um material adequado.

A parametrização e a seleção dos materiais de impressão são aspectos que despertam dificuldades nos utilizadores dos sistemas de baixo custo, o que alerta também sobre a importância do desenvolvimento de uma relação de “reconhecimento usuário-sistema de impressão”, em forma de passo a passo, como um produto final desta pesquisa.



## CAPÍTULO 3

# ESTUDOS PRELIMINARES

---

### 3.1 ESTUDO DE CASO EXPLORATÓRIO: “UDOO CASE”

O estudo de caso proposto neste tópico foi realizado com o intuito principal de identificar, através de um método interativo e experimental, os principais problemas associados à Impressão 3D por extrusão de elementos com conexões *snap-fit*. Para se reconhecer os desafios relacionados ao tema, adotou-se como padrão para esta análise o critério da mínima interferência, ou seja, fabricar as peças respeitando a condição inicial (parâmetros, máquina e material) do sistema de impressão. Tal estratégia visou reduzir a presença de ruídos externos e melhorar o processo de fragmentação da questão da tese. As respostas obtidas nesta etapa, em conjunto com os critérios necessários para o desenvolvimento de tais conexões, foram utilizadas para determinar as demais fases desta pesquisa. Este trabalho foi apresentado e publicado na forma de artigo no 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF) 2017, com o seguinte título: “APLICAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D DE BAIXO CUSTO NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS COM CONEXÕES SNAP-FIT” (SANTANA *et al.*, 2017a).

#### 3.1.1 Materiais e métodos

Foi projetado e construído um gabinete para o *Mini PC UDOO*<sup>16</sup>, constituído basicamente de duas partes, tampa e base, Figura 48 (a). O modelo foi utilizado para avaliar as capacidades do processo de Impressão 3D por extrusão e de baixo custo na fabricação de elementos conectados por *snap-fits*. Foi utilizado o modelo gancho reto (Bareta et al, 2011) de conexão *snap-fit*, Figura 48 (b), em um total de quatro pares de encaixe — isto é, macho e fêmea, Figura 48 (1) (b) e (c) —, localizados em duas das quatro faces do gabinete. As dimensões em destaque correspondem respectivamente a largura ( $L_b$ ), comprimento até a presilha ( $C_b$ ) e espessura ( $E_b$ ) da barra cantilever, e a largura ( $L_f$ ) e altura ( $h_f$ ) da parte fêmea. Ressalta-se que

---

<sup>16</sup> Informações complementares sobre o dispositivo encontram-se disponíveis na página do fabricante: <http://www.udoo.org/> Acesso em 7 de maio de 2017.

o produto foi selecionado justamente por se tratar de um conjunto personalizado e, portanto, adequado para a aplicação da tecnologia de processamento abordada.

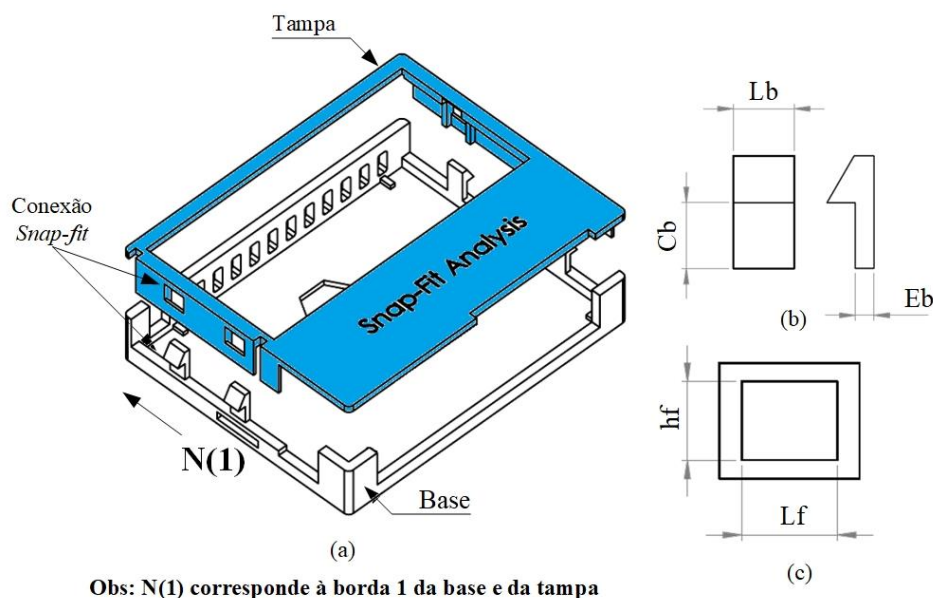


Figura 48 – Gabinete para *Mini PC UDOO* (a); elementos macho (b) e fêmea (c) da conexão *snap-fit* (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017a).

Dois modelos de gabinete foram planejados de forma evolutiva, isto é, primeiramente uma concepção foi projetada, construída, e testada, e as experiências obtidas foram utilizadas como informações de entradas para o desenvolvimento do segundo conjunto. As concepções diferenciaram-se entre si principalmente em função das folgas, Figura 49 (a), atribuídas entre os elementos macho e fêmea da conexão *snap-fit* — respectivamente (0,5 e 1) mm para as concepções 1 e 2 —, e pela interferência entre as bordas das duas partes que constituem o conjunto, na montagem do mesmo. Relativamente à interação entre as bordas, foi estabelecido na concepção 1 um encaixe fino — Figura 49 (b) — entre a borda da tampa, de 1 mm de espessura, e um recuo de mesma dimensão aplicado às paredes da base. Já na concepção 2, duas das bordas laterais da tampa foram removidas — Figura 49 (c) —, mantendo-se apenas as que continham a parte fêmea da união *snap-fit*.

É importante ressaltar que, em função do caráter investigativo do estudo de caso, os aspectos de projeto aplicados no desenvolvimento das concepções são característicos do *design* de peças para os tradicionais métodos de fabricação de componentes poliméricos, tais como a moldagem por injeção. Em outras palavras, não foram utilizados conceitos especialistas ou fatores de correção no projeto das peças relacionados às peculiaridades do processo de Impressão 3D por extrusão em máquinas de baixo custo.

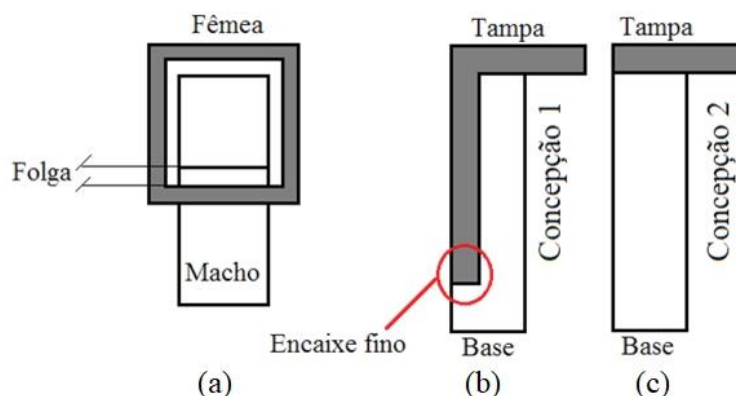


Figura 49 – Representação da folga entre os elementos da conexão *snap-fit* (a) e ilustração da interação entre bordas nas concepções 1 (b) e 2 (c) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017a).

As peças foram fabricadas em uma impressora 3D modelo *Prusa I3 Hephestos*. Um filamento de Poli (Ácido Lático) (PLA) de 1,75 mm de diâmetro da empresa *3D Ink*<sup>®</sup> foi utilizado para a construção das partes. Para o fatiamento do modelo 3D das peças e o planejamento do processo foi aplicado o *software* livre *Craftware*. Os parâmetros de processo em sua maioria foram mantidos com valores *default* do programa, exceto: espessura de camada em 0,32 mm — visando a compatibilidade com o diâmetro do bico (0,4 mm) —, velocidade de impressão (40 mm/s) e temperatura de aquecimento da base de impressão (80° C, do início ao fim do processo). Para a temperatura de extrusão do material foi mantido o valor de 215°C que o *software* adota como padrão para o PLA.

É importante mencionar que o *software Craftware* foi utilizado neste primeiro momento por oferecer uma interface amigável (de fácil uso) para que o usuário posicione manualmente as estruturas de suporte. Estruturas estas que foram necessárias para a fabricação dos gabinetes, principalmente pela orientação de construção das peças, e pelas geometrias dos elementos macho e fêmea da conexão *snap-fit*, Figura 50.

Por fim, no primeiro momento, as peças foram avaliadas dimensionalmente com auxílio de um paquímetro *Mitutoyo*<sup>®</sup> (com resolução de 0,02 mm) — com cinco medições por região analisada — e por aquisição de imagens macro (câmera Panasonic HC-V110, zoom óptico 72x). Com os resultados obtidos com o primeiro conjunto de peças, buscou-se, na segunda concepção, utilizar uma tecnologia de análise, neste caso o levantamento de forma por escaneamento 3D (equipamento *ATOS Triple Scan, Gom*), que permitisse identificar de melhor forma os desvios dimensionais — determinados a partir da correlação direta com o modelo CAD —, em diversos pontos ao longo da extensão de áreas do modelo real, além de distorções de forma, como empenamentos. Uma síntese da metodologia aplicada no estudo é apresentada na Figura 51.

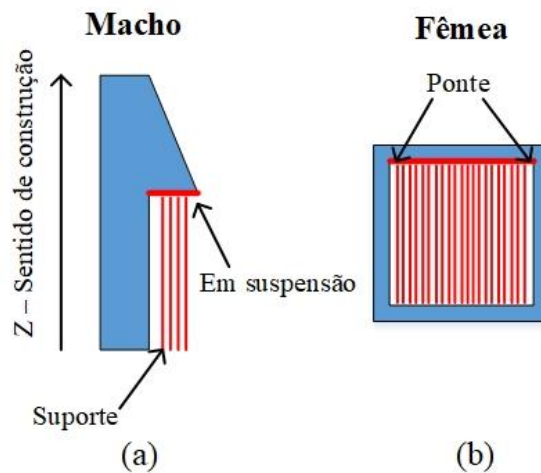


Figura 50 – Regiões com necessidade de uso de estruturas de suporte durante a impressão 3D das peças.

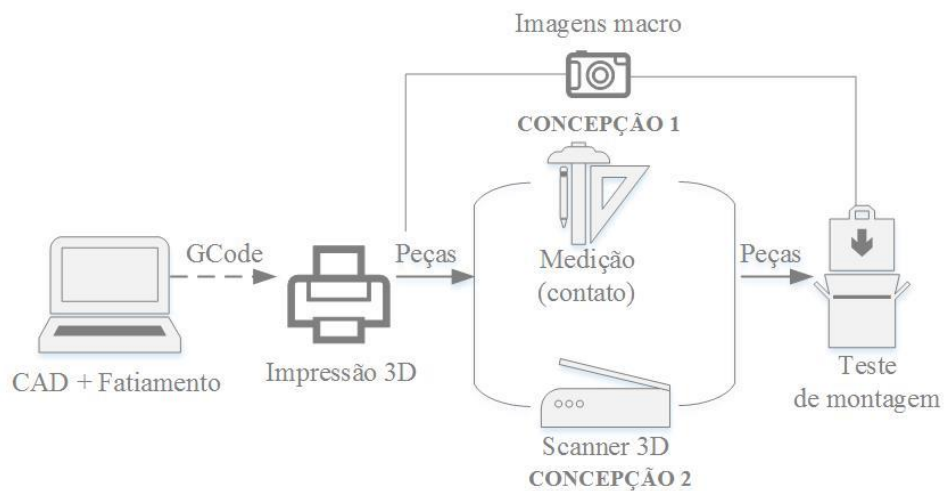


Figura 51 – Metodologia do estudo de caso exploratório (SANTANA *et al.*, 2017a).

### 3.1.2 Resultados e discussões

#### 3.1.2.1 Conceção 1

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da análise dimensional das partes das peças (base e tampa) diretamente relacionadas à montagem do produto: espessura das bordas, recuo e elementos da conexão *snap-fit*. As estruturas foram numeradas de 1 a 4. Para melhor compreensão das informações apresentadas na Tabela 7, na Figura 48 (a) foi feita uma referência de posicionamento, representada pela denotação “N(1)”, que indica a borda 1 da tampa e da base, o recuo 1 da base e o par de conexão *snap-fit* 1. A seta na mesma figura indica o sentido horário de incremento da numeração.

Tabela 7 – Resultados da análise dimensional para os elementos relacionados à montagem do gabinete (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017a).

Referência	Base (mm)			
	$Bordas = E_b$	$Recuo$	$L_b$	$C_b$
N(1) <sup>17</sup>	$3,05 \pm 0,15$	$0,93 \pm 0,02$	$6,42 \pm 0,07$	$3,19 \pm 0,11$
N(2)	$3,06 \pm 0,13$	$0,95 \pm 0,07$	$6,47 \pm 0,10$	$3,34 \pm 0,14$
N(3)	$3,13 \pm 0,06$	$0,96 \pm 0,03$	$6,38 \pm 0,02$	$3,16 \pm 0,14$
N(4)	$3,01 \pm 0,10$	$0,97 \pm 0,08$	$6,43 \pm 0,04$	$3,28 \pm 0,39$
Média <sup>18</sup>	$3,06 \pm 0,05$	$0,95 \pm 0,02$	$6,43 \pm 0,03$	$3,24 \pm 0,08$
Valor nominal	2,50	1,00	6,00	4,00
Erro (%) <sup>19</sup>	22,50	-5,00	7,00	-19,00

Referência	Tampa (mm)		
	$Bordas$	$L_f$	$h_f$
N(1)	$1,55 \pm 0,06$	$6,23 \pm 0,04$	$4,89 \pm 0,04$
N(2)	$1,57 \pm 0,07$	$6,14 \pm 0,15$	$4,84 \pm 0,19$
N(3)	$1,51 \pm 0,10$	$6,18 \pm 0,02$	$4,93 \pm 0,11$
N(4)	$1,51 \pm 0,03$	$6,16 \pm 0,07$	$4,81 \pm 0,19$
Média	$1,54 \pm 0,03$	$6,18 \pm 0,04$	$4,87 \pm 0,05$
Valor real	1,00	6,50	5,50
Erro (%)	54,00	-5,00	-11,50

As medições indicaram um erro dimensional médio de aproximadamente +0,56 mm ( $\approx +22,5\%$ ) na espessura das bordas da base — originalmente com 2,5 mm — e de -0,05 mm ( $\approx -5\%$ ) para o recuo de 1mm. Relativamente às bordas da tampa, apresentaram um erro de +0,54 mm ( $\approx +54\%$ ) em relação ao valor nominal de 1 mm. A combinação dos erros dimensionais, isto é, o crescimento das dimensões das bordas da base e tampa, aliada à redução do recuo, influenciou diretamente a compatibilidade projetada para as partes, resultando na danificação da tampa durante o teste de montagem. Tais falhas caracterizaram-se pelo rompimento da união entre as camadas — Figura 52 (a) —, no sentido de empilhamento (Z), e pela quebra na região de encontro entre duas bordas (quina) — Figura 52 (b).

Os desvios dimensionais nos elementos da conexão *snap-fit* também foram relevantes quando comparados ao valor nominal: cerca de +0,43 mm ( $\approx +7\%$ ) para  $L_b$  e de -0,76 mm ( $\approx -19\%$ ) para  $C_b$ , ambos relacionados ao conector macho — salienta-se que o erro dimensional para a espessura da barra ( $E_b$ ) foi considerado igual ao da espessura das bordas N(1) (para os conectores 1 e 2) e N(3) (conectores 3 e 4). No caso da parte fêmea, as dimensões  $L_f$  e  $h_f$  apresentaram erros de -0,32 mm ( $\approx -5\%$ ) e -0,63 mm ( $\approx -11,5\%$ ). Em função das geometrias dos componentes da conexão *snap-fit* e da direção de construção da peça (Z), foi necessária a

<sup>17</sup> Os valores de N(1) a N(4), para cada uma das partes das peças, correspondem à média das cinco medições por região.

<sup>18</sup> Corresponde à “média das médias”, isto é, ao longo de cada coluna da Tabela 7.

<sup>19</sup> Calculado a partir da diferença entre a “média das médias” de cada dimensão e o valor nominal.

aplicação de estruturas de suporte<sup>20</sup> durante a impressão, conforme citado anteriormente, o que colaborou para as distorções dimensionais — Figura 53 (a) e (b). É importante destacar que a redução da área do elemento fêmea, em conjunto com o aumento da largura e a redução do comprimento até a presilha da barra cantilever, gerou outros pontos de incompatibilidade para o encaixe entre as partes.

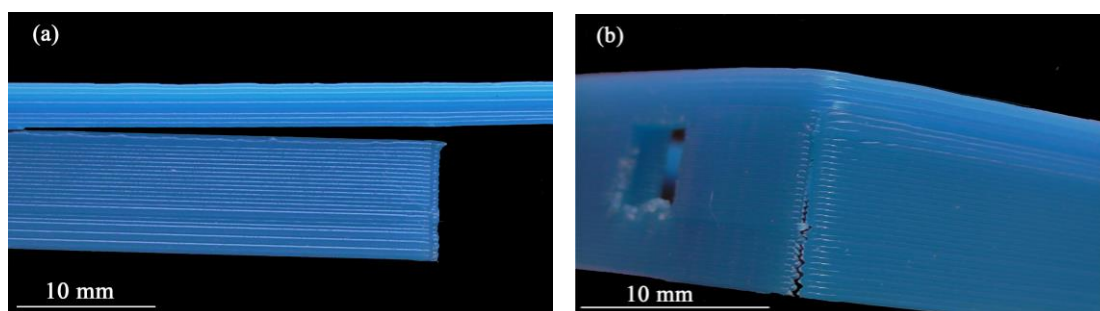


Figura 52 – Rompimento da união entre camadas (a), e fratura na região de encontro entre bordas (b) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017a).

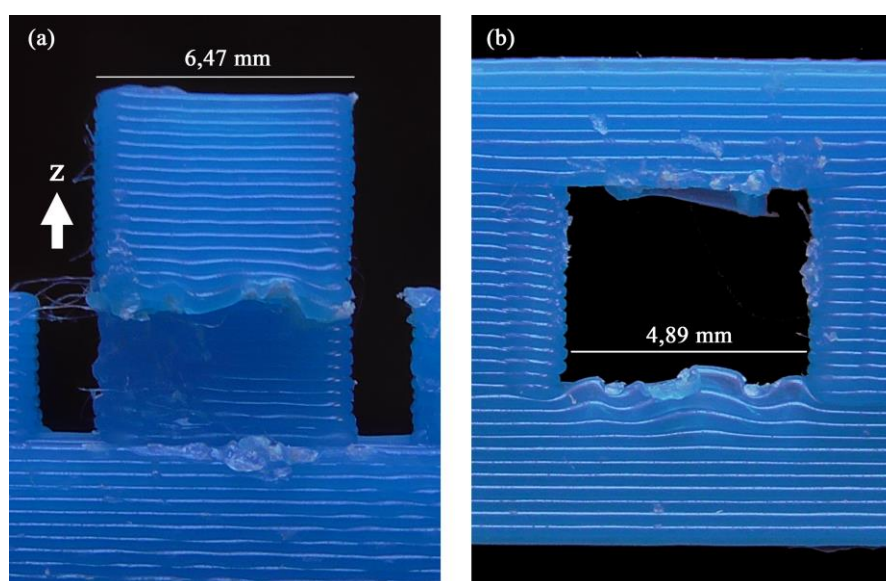


Figura 53 – Falhas nos conectores *snap-fit*: (a) macho e (b) fêmea (SANTANA *et al.*, 2017a).

Por fim, as médias das cinco medições por cada região comum das peças (bordas, recuos, elementos da conexão *snap-fit*), base e tampa, foram comparadas entre si e os resultados indicaram igualdade estatística em todas as situações — Tabela 8 e Tabela 9.

<sup>20</sup> Como o equipamento disponibilizava apenas um bico, o próprio material de construção foi utilizado como suporte.

Tabela 8 – ANOVA ( $\alpha = 95\%$ ) para os elementos dimensionais da base (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017a)

	<b>Bordas=E<sub>b</sub></b>			<b>Recuo</b>			<b>L<sub>b</sub></b>			<b>C<sub>b</sub></b>		
	<i>EG</i> <sup>21</sup>	<i>DG</i>	<i>Total</i>	<i>EG</i>	<i>DG</i>	<i>Total</i>	<i>EG</i>	<i>DG</i>	<i>Total</i>	<i>EG</i>	<i>DG</i>	<i>Total</i>
<i>gl</i>	3	16	19	3	16	19	3	16	19	3	16	19
<i>SQ</i>	0,03	0,21	0,25	0,004	0,049	0,054	0,02	0,07	0,09	0,11	0,81	0,92
<i>MQ</i>	0,011	0,013		0,001	0,003		0,006	0,004		0,04	0,05	
<i>F</i>		0,82			0,45			1,31			0,71	
<i>P</i>		0,50			0,72			0,30			0,56	

Nota: graus de liberdade (*gl*), soma dos quadrados (*SQ*), média dos quadrados (*MQ*), Teste F (*F*), valor P (*P*).

Tabela 9 – ANOVA ( $\alpha = 95\%$ ) para os elementos dimensionais da tampa (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017a).

	<b>Bordas</b>			<b>L<sub>r</sub></b>			<b>h<sub>r</sub></b>		
	<i>EG</i>	<i>DG</i>	<i>Total</i>	<i>EG</i>	<i>DG</i>	<i>Total</i>	<i>EG</i>	<i>DG</i>	<i>Total</i>
<i>gl</i>	3	16	19	3	16	19	3	16	19
<i>SQ</i>	0,01	0,07	0,09	0,02	0,11	0,13	0,04	0,33	0,38
<i>MQ</i>	0,005	0,005		0,01	0,01		0,01	0,02	
<i>F</i>		0,99			1,11			0,67	
<i>P</i>		0,42			0,38			0,59	

### 3.1.2.2 Concepção 2

Conforme citado anteriormente, na segunda concepção os pontos de contato entre as bordas da tampa e da base foram removidos e, portanto, os principais elementos relacionados ao processo de montagem foram os elementos da conexão *snap-fit*. Na Figura 54 são apresentados os resultados do levantamento de forma para os conectores N(3) e N(4), cujas variações dimensionais foram mais consideráveis entre os machos. De acordo com a análise ilustrada na Figura 54, a maior parte dos desvios nestas regiões foram positivos — apesar de alguns valores negativos, em torno de -0,56 mm, serem observados —, isto é, no sentido de aumentar as dimensões, atingindo valores críticos em torno de +1,04 mm em N(4) .

Assim como nos machos, os conectores N(3) e N(4) fêmeas também foram os que apresentaram os maiores erros dimensionais — Figura 55. Coincidentemente os desvios nestas partes também tiveram valores positivos — máximos de (+ 1,32 e +1,33) mm —, e portanto, colaboraram para o crescimento das dimensões e, consequentemente, para a redução das folgas projetadas para o elemento. Ainda assim, como as folgas foram consideravelmente maiores na concepção 2, foi possível o encaixe entre as partes através da conexão *snap-fit* — Figura 56. É importante ressaltar que tanto nos conectores machos quanto nos fêmeas os maiores desvios

<sup>21</sup> As siglas “EG” e “DG” correspondem respectivamente às terminologias “entre grupos” e “dentro de grupos”.



(negativos ou positivos) foram nas regiões de aplicação do material de suporte, assim como na concepção 1.

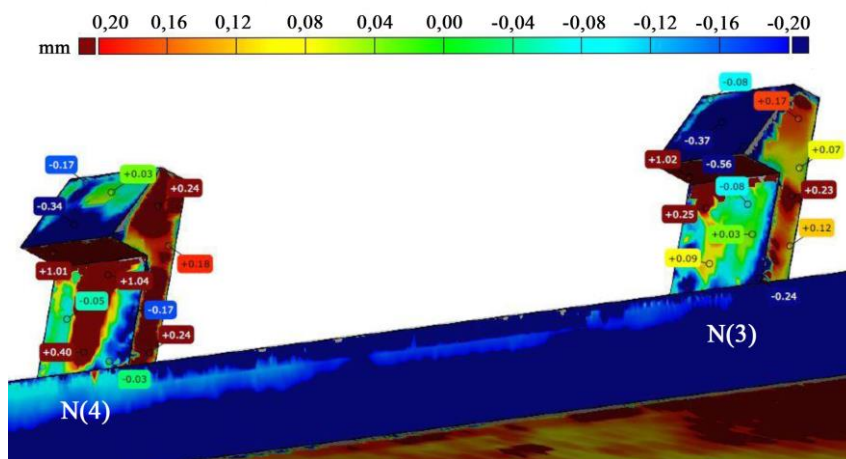


Figura 54 – Levantamento de forma, conectores machos (SANTANA *et al.*, 2017a).

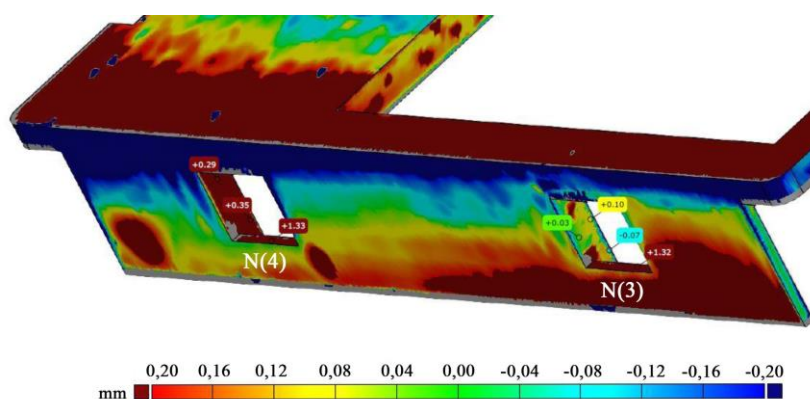


Figura 55 – Levantamento de forma, conectores fêmeas (SANTANA *et al.*, 2017a).



Figura 56 – Encaixe entre os elementos macho e fêmea (SANTANA *et al.*, 2017a).<sup>22</sup>.

<sup>22</sup> Os círculos pretos nas peças, apresentados na Figura 56 e na Figura 57, são pontos de referência para o processo de digitalização.



Seguindo com a apresentação dos resultados da análise por escaneamento 3D, na Tabela 10 são sintetizados os principais desvios dimensionais identificados ao longo das áreas das bordas e demais componentes da união *snap-fit* para a base e a tampa da concepção 2.

Tabela 10 – Desvios dimensionais na concepção 2: análise por escaneamento 3D (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017a).

Referência	Base (mm)		Tampa (mm)	
	Bordas	Machos	Bordas	Fêmeas
N(1)	+0,49 a +0,77	-0,27 a +0,76	-0,31 a +0,50	+0,18 a +0,99
N(2)	+0,09 a +1,34	-0,26 a +0,74	-	-0,09 a +1,11
N(3)	-0,40 a -0,38	-0,56 a +1,02	-0,34 a +0,40	+0,03 a +1,32
N(4)	-0,40 a +0,13	-0,34 a +1,04	-	+0,29 a +1,33

Boa parte dos desvios positivos identificados nas concepções 1 e 2, os quais aumentaram as dimensões das peças, foram atribuídos ao excesso de material depositado ao longo das superfícies, visivelmente perceptível na Figura 57.

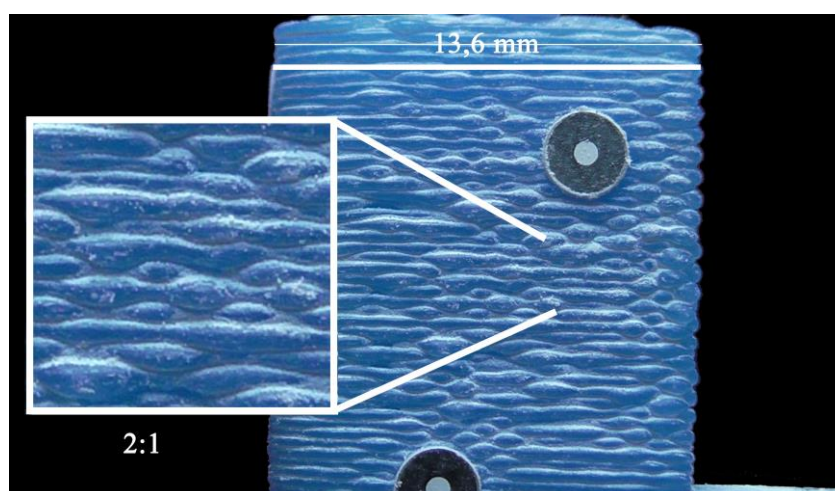


Figura 57 – Excesso de material depositado (SANTANA *et al.*, 2017a).

Ainda sobre os resultados obtidos com a digitalização das peças impressas, em uma análise geral das superfícies foi possível associar os desvios negativos, Figura 58 (a), com o empenamento das peças. Na Figura 58 (b) este efeito fica mais claro, uma vez que os dois modelos, CAD 3D (azul) e digitalizado (cinza), são sobrepostos. Por fim, na Figura 59, (a) e (b), é apresentada a montagem final do produto, sem danos causados pelo teste de montagem.

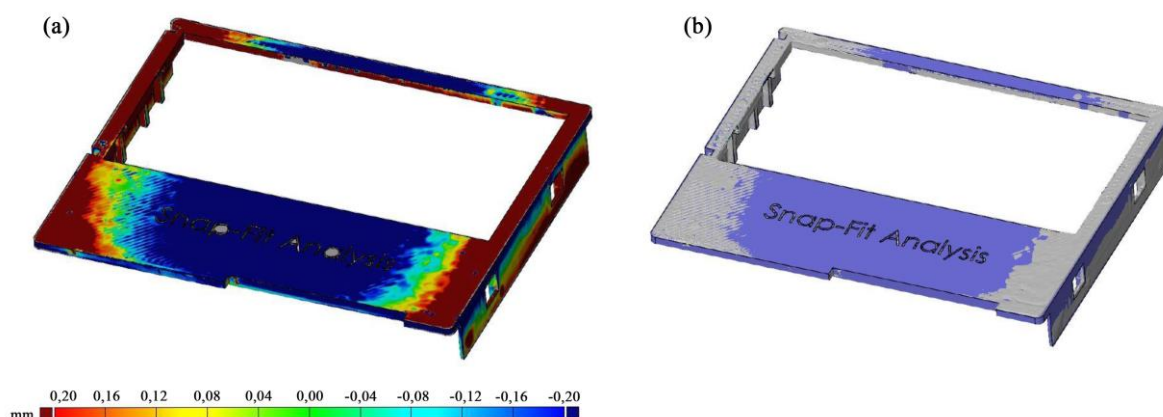


Figura 58 – Empenamento: desvios dimensionais (a), modelos sobrepostos (b) (SANTANA *et al.*, 2017a).

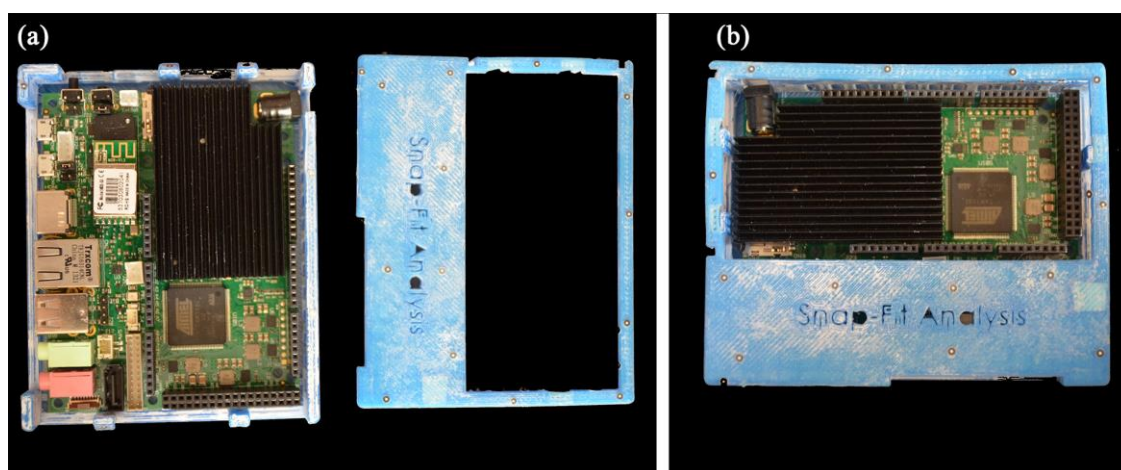


Figura 59 – Montagem do produto: (a) gabinete aberto, (b) gabinete montado (SANTANA *et al.*, 2017a).

### 3.1.3 Conclusões sobre o caso exploratório

Os resultados apresentados no estudo preliminar foram satisfatórios diante da proposta inicial do trabalho que consistia na identificação e exploração dos principais problemas relacionados à fabricação de componentes para montagem por Impressão 3D baseada em extrusão e de baixo custo, sem a preocupação inicial de otimização paramétrica. As variações no modelo CAD caracterizam-se como um fator significativo ao estudo, uma vez que, apesar das distorções de forma e dimensionais verificadas, a inserção de maiores folgas e a eliminação de pontos de interferência entre as partes permitiram a montagem do sistema, na concepção 2, sem danos às partes envolvidas. Assim se destaca a importância de se explorar o desenvolvimento e a aplicação de conceitos de projeto dedicados às características da Impressão 3D, em especial a de baixo custo, pois o uso de técnicas convencionais mostrou-se não ser replicável nos modelos construídos.

Relativamente aos erros dimensionais, quando a magnitude foi avaliada em um aspecto geral, conforme realizado na análise da concepção 1, foi possível identificar certa proximidade entre os valores para cada conjunto de regiões comuns — isto é, entre bordas, recuos e elementos *snap-fit* —, fortalecendo assim a ideia de ser um erro do processo de fabricação e, portanto, passível de correção também através da configuração de parâmetros de impressão, principalmente dos relacionados ao controle da deposição. A ausência — por falta de abrangência — ou a presença — devido ao processo de remoção, uma vez que material de construção foi usado para sustentação — de estruturas de suporte foram prejudiciais à estabilidade dimensional e de forma dos conectores *snap-fit*. Tal efeito negativo sugere o desenvolvimento de estratégias para a otimização do processo de fabricação, seja quanto ao projeto dos componentes, à orientação de construção, ou mesmo a adaptações no equipamento para a utilização de um segundo material, específicos para suportes. O uso de bicos com menores diâmetros é outra alternativa para melhorar a resolução e a precisão da construção das peças, uma vez que torna possível a aplicação de menores espessuras de camada.

A fraca resistência entre as camadas também foi um fator pertinente no estudo, sendo assim, esforços devem ser realizados para melhorar a qualidade da união entre camadas, ou para o desenvolvimento de reforços em regiões solicitadas no processo de montagem. O empenamento das peças ressalta a necessidade de um controle da estabilidade durante e após a construção dos componentes, envolvendo estudos para melhorar a adesão dos elementos durante a impressão, ou mesmo compensar as características de contração do material. Por fim, os erros encontrados são motivadores do ponto de vista técnico-científico, pois abrem muitas oportunidades de pesquisas a fim de superá-los e poder utilizar todas as vantagens do universo de código aberto e baixo custo para a fabricação de conjuntos funcionais em baixa escala.

### 3.2 ESTUDO DE CALIBRAÇÃO PARAMÉTRICA

Os resultados do estudo de caso exploratório, entre outras descobertas, mostraram existir diferenças dimensionais significativas entre os modelos fabricados e o projeto original. Buscou-se então realizar um trabalho experimental para determinar uma “configuração base” para os principais parâmetros de entrada do processo de Impressão 3D, que estabilizasse as dimensões de uma geometria padrão. Além de melhorar a qualidade dimensional, este estudo visou também mapear as causas de erros dimensionais e selecionar um *software* de fatiamento.

Foi abordado o maior número possível de variáveis de influência do processo, visando reduzir o número de fatores a serem explorados nas etapas posteriores da tese podendo assim

direcionar os esforços na análise de parâmetros especiais para a confecção de geometrias complexas, como os *snap-fits*. Nesta etapa, diferentemente do estudo da seção 3.1, foram utilizados os *softwares* Slic3r e Cura, uma vez que são os mais difundidos quando se trata de plataformas abertas e gratuitas. O estudo de calibração paramétrica gerou um artigo publicado na revista *Materials & Design*, com o título: “*A study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality*” (SANTANA *et al.*, 2017b).

### 3.2.1 Materiais e métodos

O estudo foi dividido em duas etapas. No primeiro momento, a qualidade dimensional das peças impressas foi avaliada em função da variação de seis fatores, caracterizados por ferramentas de planejamento do processo de fabricação (*softwares* CAM) e parâmetros construtivos: *software* de fatiamento ( $S_f$ ), espessura de camada ( $E_c$ ), percentual de preenchimento ( $P_p$ ), velocidades da primeira camada ( $V_{pc}$ ), preenchimento ( $V_p$ ) e perímetros ( $V_{pe}$ ) — Figura 60 (a). Para cada fator foram atribuídos dois níveis (Tabela 11) e as condições de análise, isto é, as combinações entre os fatores e seus respectivos valores foram determinadas a partir da aplicação de um arranjo ortogonal L8 de Taguchi (Tabela 12). Em cada condição foram realizadas três repetições, gerando um total de 24 amostras.

Tabela 11 – Fatores e níveis para as etapas experimentais 1 e 2, e parâmetros fixos (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Etapa	Fator	Nome no Slic3r	Nome no Cura	Níveis		
				1	2	3
1	$E_c$ (mm)	<i>Layer height, first layer height</i>	<i>Layer height, initial layer thickness</i>	0,25	0,30	-
	$P_p$ (%)	<i>Fill density</i>	<i>Fill density</i>	20	100	-
	$V_{pc}$ (mm/s)	<i>First layer speed</i>	<i>Bottom layer speed</i>	15	30	-
	$V_p$ (mm/s)	<i>Infill, solid infill, top solid infill</i>	<i>Infill speed, Top/bottom speed</i>	40	60	-
	$V_{pe}$ (mm/s)	<i>Perimeters, small perimeters, external perimeters</i>	<i>Outer shell speed, Inner shell speed</i>	20	60	-
	$S_f$	Slic3r (1.2.9)	Cura (15.04.6)	Slic3r	Cura	-
2	$T_e$ (°C)	<i>Temperature (°C) - Extruder</i>	*	190	210	220
	$M_e$	<i>Extrusion multiplier</i>	*	0,5	0,9	1
Parâmetros fixos		Nome no Slic3r	Nome no Cura	Valor		
$N_p$		<i>Perimeters</i>	<i>Shell thickness</i>	3		
$A_v$ (°)		<i>Fill angle</i>	Não ajustável	45/-45		
$T_e$ (°C) (etapa 1)		<i>Temperature (°C) - Extruder</i>	<i>Printing temperature</i>	210		
$T_b$ (°C)		<i>Temperature (°C) – Bed</i>	<i>Bed temperature</i>	70		

Continua

Tabela 11 – Fatores e níveis para as etapas experimentais 1 e 2, e parâmetros fixos (Continuação) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

$C_f$ (etapa 1)	<i>Extrusion multiplier</i>	<i>Flow</i>	1 (100%)
Resfriamento	<i>Enable auto cooling</i>	<i>Enable cooling fan</i>	Sim
$D_n$ (mm)			0,4

Notes:

- $N_p$  (número de perímetros),  $A_v$  (ângulo de varredura),  $T_b$  (temperatura da base),  $C_f$  (controle de fluxo),  $D_n$  (diâmetro do bico);
- Na versão utilizada do Cura, não há uma “caixa de configuração” para o ângulo de varredura, porém o *software* adotou como padrão o valor de 45°/-45°;
- Resfriamento: acionamento e controle do sistema de resfriamento da peça durante a impressão, após as primeiras camadas fabricadas;
- No Cura não há uma caixa para configurar o número de perímetros, porém com o parâmetro *Shell thickness* foi possível inserir 3 perímetros, multiplicando o diâmetro do bico (0,4 mm) por 3 (1,2 mm). O valor da multiplicação é o que configura o parâmetro citado.

Tabela 12 – Arranjo ortogonal L8 de Taguchi e delineamento experimental fatorial completo (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Condições	Taguchi L8						Condições	Fatorial ( $2^3$ )	
	$E_c$	$P_p$	$V_{pc}$	$V_p$	$V_{pe}$	$S_f$		$T_e$	$M_e$
1	0,25	20	15	40	20	Slic3r	1	190	0,5
2	0,25	20	15	60	60	Cura	2	190	0,9
3	0,25	100	30	40	20	Cura	3	220	0,5
4	0,25	100	30	60	60	Slic3r	4	220	1
5	0,30	20	30	40	60	Slic3r	5	210	0,9
6	0,30	20	30	60	20	Cura	6	210	0,5
7	0,30	100	15	40	60	Cura	7	190	1
8	0,30	100	15	60	20	Slic3r	8	210	1
							9	220	0,9

Com base nas informações obtidas na primeira etapa do trabalho, a segunda parte da análise teve como objetivo melhorar as situações críticas observadas, neste caso as amostras construídas com percentual de preenchimento em 100%. Para tal foi realizado o ajuste de parâmetros relacionados com o processamento do material — temperatura de extrusão ( $T_e$ ) —, e com o controle do fluxo de material — multiplicador de extrusão ( $M_e$ ). É importante ressaltar que os demais parâmetros avaliados na primeira etapa foram mantidos fixos nos níveis que geraram os melhores resultados. Em função do menor número de parâmetros analisados, foi utilizado um delineamento experimental do tipo fatorial completo (Tabela 12) para dois fatores, três níveis (Tabela 11) e três repetições para cada condição. No total foram fabricadas 27 amostras. Em ambas as etapas, 1 e 2, cada amostra de cada condição experimental foi fabricada individualmente, com o objetivo de se manter as mesmas condições de nivelamento e aquecimento da plataforma de construção.

Uma geometria cúbica de (15x15x15) mm, Figura 60 (b), foi adotada como padrão para análise dimensional nas etapas experimentais. As peças foram construídas com um filamento

de PLA azul, de 1,75 mm de diâmetro, da empresa *3D INK*<sup>®</sup>, em uma impressora 3D modelo *Prusa I3 Hephestos*. Em cada uma das direções principais das amostras, X, Y e Z, foram realizadas três medições, conforme mostrado na Figura 60 (c), com o auxílio de um micrômetro com resolução de 0,0025 mm (diâmetro da face medição = 6,50 mm). Um *scanner 3D Atos Triple Scan (Gom)* (resolução das câmeras de 16 megapixels) foi utilizado para o levantamento de formas nas peças com maior e menor dispersão em torno dos valores dimensionais projetados. Além das análises citadas anteriormente, a massa de todas as amostras foi medida (balança,  $d=0,005\text{g}$ ).

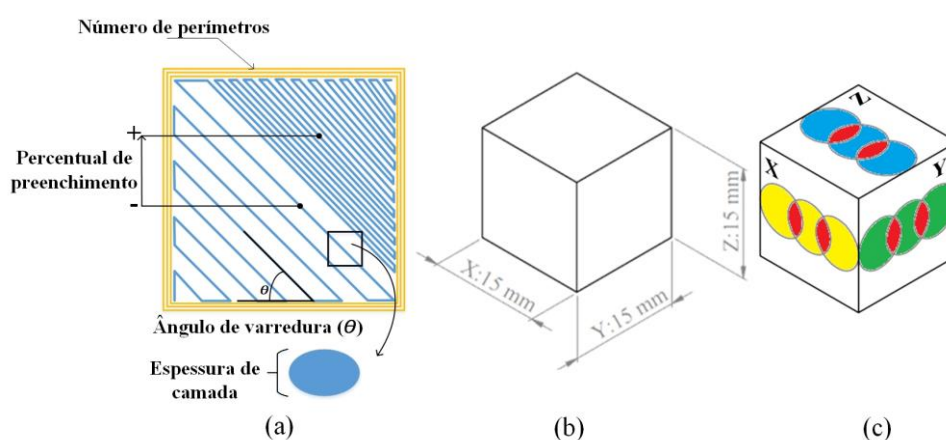


Figura 60 – Parâmetros de processo (a), amostra cúbica (b) e pontos de medição para os três eixos (c) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b)<sup>23</sup>.

### 3.2.2 Resultados e discussões

#### 3.2.2.1 Etapa 1

Os resultados da análise dimensional por direções (X, Y e Z) para cada uma das condições experimentais (Tabela 12) são apresentados na Tabela 13. Para identificar os efeitos dos fatores avaliados sobre as variações dimensionais apresentadas, foram utilizados os conceitos da análise de variância (ANOVA) (Tabela 14).

A partir das análises estatísticas foi possível verificar que os fatores percentual de preenchimento ( $P_p$ ), velocidades de preenchimento e perímetros ( $V_p$  e  $V_{pe}$ ), e o *software* de fatiamento ( $S_f$ ) foram significativos para as variações dimensionais do eixo X das peças. No

<sup>23</sup> As regiões em vermelho correspondem a intersecção entre os pontos de medição nas faces do cubo (X, Y e Z). Tal intersecção acontece em função do diâmetro da face de medição do micrômetro (6,50 mm).

caso das direções Y e Z, os parâmetros citados anteriormente para X também influenciaram estatisticamente nas respostas. No entanto, diferentemente da situação anterior, a velocidade de construção da primeira camada ( $V_{pc}$ ) também teve uma parcela de contribuição para os efeitos observados.

Tabela 13 – Resultados da análise dimensional por condições experimentais (L8 de Taguchi) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Condições	Dimensões em X (mm)		Dimension for Y (mm)		Dimension for Z (mm)	
	Média	$E_{dm}$	Média	$E_{dm}$	Média	$E_{dm}$
1	15,01 ± 0,03	0,01	15,05 ± 0,03	0,05	14,98 ± 0,03	-0,02
2	15,29 ± 0,04	0,29	15,30 ± 0,02	0,30	15,04 ± 0,06	0,04
3	15,48 ± 0,05	0,48	15,57 ± 0,05	0,57	15,59 ± 0,05	0,59
4	15,39 ± 0,02	0,39	15,54 ± 0,03	0,54	15,85 ± 0,03	0,85
5	15,09 ± 0,01	0,09	15,13 ± 0,02	0,13	15,09 ± 0,01	0,09
6	15,17 ± 0,02	0,17	15,25 ± 0,02	0,25	15,03 ± 0,01	0,03
7	15,45 ± 0,03	0,45	15,56 ± 0,05	0,56	15,50 ± 0,04	0,50
8	15,34 ± 0,03	0,34	15,44 ± 0,01	0,44	15,72 ± 0,02	0,72

Nota: o erro dimensional médio ( $E_{dm}$ ) corresponde à diferença entre a “média das médias” das dimensões, para cada direção, das três amostras fabricadas e o valor verdadeiro (CAD, 15 mm).

Tabela 14 – Análises estatísticas para as variações dimensionais da etapa 1 (L8 de Taguchi) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Fatores	ANOVA direção X					
	<i>Gl</i>	<i>SQ</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>P%</i>
$E_c$	(1)	(0,006)	<i>Pooled</i>			
$P_p$	1	0,463	0,463	260,71	0,0001	71,61
$V_{pc}$	(1)	(0,001)	<i>Pooled</i>			
$V_p$	1	0,011	0,011	6,33	0,0210	1,47
$V_{pe}$	1	0,017	0,017	9,45	0,0062	2,33
$S_f$	1	0,119	0,119	67,19	0,0001	18,25
<i>Erro</i>	18	0,034	0,002	1,00		6,34
<i>Total</i>	23					100,00

Fatores	ANOVA direção Y					
	<i>Gl</i>	<i>SQ</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>P%</i>
$E_c$	(1)	(0,002)	<i>Pooled</i>			
$P_p$	1	0,710	0,710	677,35	0,0001	81,56
$V_{pc}$	1	0,007	0,007	6,66	0,0188	0,68
$V_p$	1	0,016	0,016	15,21	0,0010	1,71
$V_{pe}$	1	0,018	0,018	16,95	0,0006	1,92
$S_f$	1	0,100	0,100	95,10	0,0001	11,35
<i>Erro</i>	18	0,019	0,001	1,00		2,77
<i>Total</i>	23					100,00

Fatores	ANOVA direção Z					
	<i>Gl</i>	<i>SQ</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>P%</i>
$E_c$	(1)	(0,005)	<i>Pooled</i>			
$P_p$	1	2,371	2,371	1559,48	0,0001	90,44
$V_{pc}$	1	0,041	0,041	26,85	0,0001	1,50

Continua

Tabela 14 – Análises estatísticas para as variações dimensionais da etapa 1 (L8 de Taguchi) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b) (Continuação).

$V_p$	1	0,086	0,086	56,55	0,0001	3,22
$V_{pe}$	1	0,009	0,009	6,04	0,0244	0,29
$S_f$	1	0,086	0,086	56,29	0,0001	3,21
<i>Erro</i>	18	0,027	0,002	1,00		1,33
<i>Total</i>	23					100,00

Análise de correlação						
Fatores	Direção X		Direção Y		Direção Z	
	$C_c$	$P$	$C_c$	$P$	$C_c$	$P$
$E_c$	-0,09	0,67	-0,05	0,80	-0,04	0,84
$P_p$	0,85	0,00	0,90	0,00	0,95	0,00
$V_{pc}$	0,04	0,86	0,09	0,68	0,13	0,56
$V_p$	0,13	0,54	0,14	0,53	0,18	0,40
$V_{pe}$	0,16	0,45	0,14	0,51	0,06	0,78

Nota:

- Todas as análises estatísticas foram realizadas com um nível de confiabilidade ( $\alpha$ ) de 95%;
- Coeficiente de correlação ( $C_c$ ).

É importante destacar, com base nos resultados da ANOVA (Tabela 14), as maiores contribuições do percentual de preenchimento ( $P_p$ ), quando comparadas às demais variáveis investigadas, sendo: 71,61% para a direção X, 81,56% para Y, e 90,44% para Z. Complementando ainda os resultados da análise estatística, foi possível identificar que as variações dimensionais nas três direções das peças, para cada nível relacionado aos parâmetros significativos, seguiu uma tendência — mais acentuada em alguns casos — de crescimento das dispersões em torno do valor alvo do menor para o maior nível configurado, resultando em cubos com dimensões maiores do que as projetadas. Já em função dos *softwares* de fatiamento, os melhores resultados, ou seja, os mais próximos ao valor real, foram com o Slic3r para as direções X e Y e com o Cura para Z. Os comportamentos descritos — isto é, a média das dimensões em função dos fatores e níveis — são apresentados nos gráficos da Figura 61, para as direções X, Y, e Z.

As médias da Figura 61 mostram um “crescimento” das dimensões em função do uso de maiores velocidades. O efeito pode ser interpretado sob o aspecto do aumento do volume de material depositado ( $\text{mm}^3/\text{s}$ ), que é proporcional à variação da velocidade, associado ao tempo e ao espaço — que reduz ou aumenta de 100% para 20% de  $P_p$  — de acomodação entre dois ou mais filamentos vizinhos (Figura 62). A acomodação citada pode ser entendida como a capacidade do filamento depositado em estabilizar suavemente suas dimensões principais e a sua interação com os elementos adjacentes dentro e entre camadas. Instabilidades neste processo alteram a resolução de construção das peças.



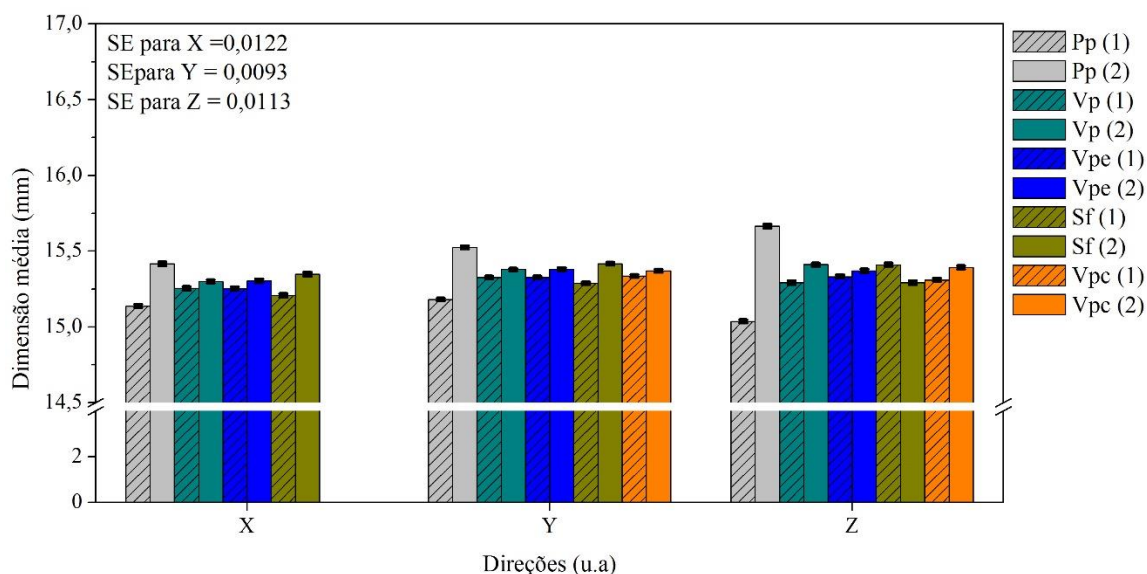


Figura 61 – Variação dimensional em função dos fatores e níveis, para as direções X, Y e Z (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

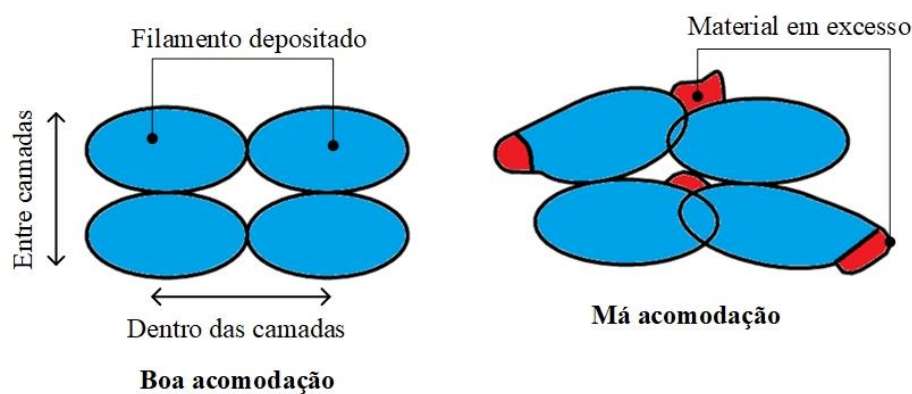


Figura 62 – Acomodação dos filamentos depositados, entre e dentro das camadas (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Ainda sobre as velocidades, os resultados obtidos fazem sentido quando se tem uma maior influência da velocidade dos perímetros em X e Y — no sentido de construção lateral — e de preenchimento em Z. As primeiras e últimas camadas, mesmo nas amostras com 20% de preenchimento, são construídas com Pp igual a 100%. Tal característica construtiva, em conjunto com maiores velocidades de preenchimento, reduz a já citada capacidade de acomodação dos filamentos depositados, aumentando assim as dimensões em Z. As maiores variações dimensionais em Z para o Slic3r em relação ao Cura resultaram principalmente do fato de que a combinação mais crítica entre velocidade de preenchimento (60 mm/s) e percentual de preenchimento (100%), Condições 4 e 8 (Tabela 13), foram associadas ao Slic3r, colaborando assim para o crescimento da média associada ao nível.

O Cura gera códigos de construção das peças com velocidades de impressão iguais ou muito próximas ao valor ajustado pelo usuário, diferentemente do Slic3r, que realiza uma série de ajustes, que na maior parte dos casos reduz, e muito, as velocidades em relação ao valor original configurado, em função de fatores como o uso do resfriamento (Figura 63). Por isso, acredita-se que as maiores dispersões dimensionais relacionadas ao Cura estejam conectadas a este fato, pois as maiores vazões volumétricas associadas às maiores velocidades realmente estão sendo executadas, o que piora quando estas maiores velocidades estão associadas a preenchimentos em 100%. Isso justifica as diferenças dimensionais entre as condições 3 e 4 (Tabela 13). As diferenças entre as velocidades configuradas e as velocidades automaticamente ajustadas pelo Slic3r, na maior parte dos casos, favoreceram os resultados estatísticos associados ao Slic3r quando comparados ao Cura.

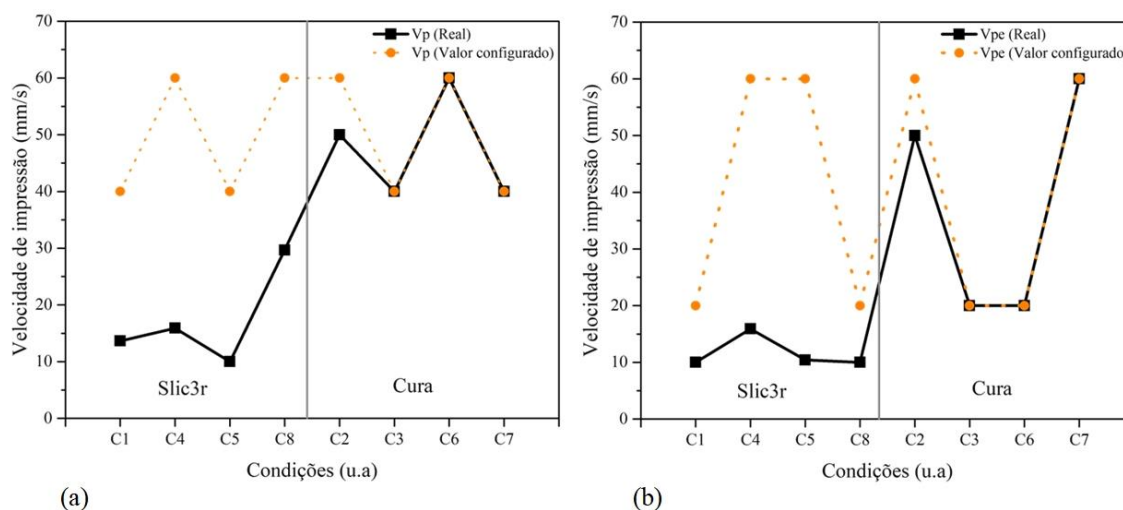


Figura 63 – Comportamento das velocidades (a) preenchimento e (b) perímetros (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b)<sup>24</sup>.

Especificamente sobre os maiores desvios dimensionais observados nas peças com Pp em 100% (Figura 61), uma das causas identificadas para o efeito mencionado está relacionada ao excesso de material depositado, decorrente de questões como a instabilidade no fluxo de extrusão e do planejamento, por parte dos *softwares* de fatiamento, da quantidade de filamento necessária para a construção das amostras com tais configurações. Para confirmar as afirmações anteriores foi realizada uma análise dos códigos de construção das amostras (Gcode), atendo-se ao comprimento de filamento a ser alimentado em cada camada do modelo. A partir do somatório dos comprimentos camada a camada e do diâmetro do filamento (1,75 mm),

<sup>24</sup> Velocidades para as camadas compreendidas entre as três primeiras e as três últimas camadas das peças.

calculou-se o volume total de material a ser extrudado. Dispondo do volume e da densidade do PLA<sup>25</sup>, estimou-se a massa que as peças fabricadas, em cada condição experimental, deveriam apresentar. Por fim, comparou-se o valor estimado com a massa média medida das amostras, conforme mostrado na Figura 64 (a).

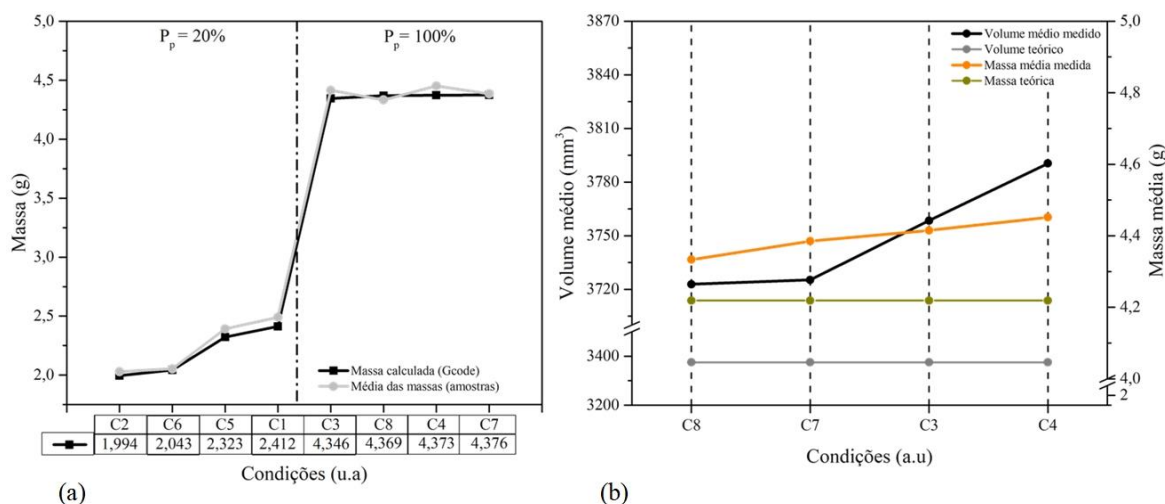


Figura 64 – Massa calculada a partir do Gcode vs. massa média medida (a); relação massa – volume (b) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

No gráfico da Figura 64 (a) observa-se que a massa média medida em todas as condições está muito próxima à massa calculada a partir das informações obtidas do Gcode. Por um lado, os resultados são positivos, pois mostram a capacidade do equipamento em reproduzir componentes conforme comandado; por outro, mostra que os *softwares* de fatiamento calculam, ou planejam, uma quantidade de material a ser alimentada superior ao total de material necessário para ocupar um volume teórico baseado nas dimensões nominais (projeto CAD) das amostras. O fato é evidenciado para o percentual de preenchimento em 100%.

A variação na quantidade de material influenciou nas distorções dimensionais, sobretudo no sentido de crescimento das mesmas — novamente com destaque para 100% de preenchimento —, o que fez com que o volume das peças aumentasse e que a massa das amostras fosse maior do que um valor teórico (4,22g) para um cubo de (15x15x15) mm em PLA. Em algumas condições, 3 e 4 por exemplo, a massa das amostras impressas, considerando vazios naturais do processo, superou um valor teórico calculado de 4,22 g em +4,7% (4,42 g para condição 3) e +5,5% (4,45 g para a condição 4) (Tabela 15). O conceito descrito é representado no gráfico da Figura 64 (b), o qual relaciona o volume médio, em ordem crescente,

<sup>25</sup> Densidade do PLA de acordo com a literatura: 1,25g/cm<sup>3</sup> (HENTON *et al.*, 2005, SANTANA *et al.*, 2016).

com suas respectivas massas médias. Os demais valores de volume por condição são apresentados na Tabela 15.

Para ilustrar os efeitos do excesso de material nas peças configuradas com 100% de preenchimento foi selecionada uma amostra da condição 3 para análise por digitalização 3D <sup>26</sup>. Nas Figuras 65 e 66 (a) e (b) são apresentados os resultados da análise de formas em relação a duas referências, Topo e Base. Em ambas as figuras, (a) representa a comparação entre o modelo real e CAD através dos desvios dimensionais em escala cromática e (b) a sobreposição entre dois modelos: CAD (cinza escuro) e digitalizado (cinza claro). Assim se pode observar as regiões nas quais a peça fabricada ultrapassou os limites geométricos do projeto original.

Tabela 15 – Valores de massa e volume das peças (Taguchi L8) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Condições	Massa (g)		Volume (mm <sup>3</sup> )	
	<i>Média</i>	<i>D<sub>f</sub></i>	<i>Média</i>	<i>E<sub>vm</sub></i>
1	2,49 ± 0,01	-1,73	3383,5 ± 14,32	8,52
2	2,03 ± 0,00	-2,19	3517,2 ± 24,07	142,16
3	4,42 ± 0,00	0,20	3758,4 ± 33,55	383,43
4	4,45 ± 0,01	0,23	3790,4 ± 14,31	415,44
5	2,39 ± 0,01	-1,83	3444,9 ± 7,26	69,95
6	2,05 ± 0,02	-2,17	3477,7 ± 4,19	102,67
7	4,39 ± 0,02	0,17	3725,3 ± 29,39	350,26
8	4,33 ± 0,02	0,11	3722,8 ± 12,52	347,83

Nota:

- O erro volumétrico médio (*E<sub>vm</sub>*) é a diferença entre o volume calculado (3375mm<sup>3</sup>) e o volume médio das peças por condições;
- Diferença (*D<sub>f</sub>*) é a subtração entre a massa média das peças por condições e o valor teórico calculado<sup>27</sup> (4,22g).

Conforme mostrado nas imagens das Figuras 65 e 66 (b), a peça fabricada praticamente englobou o modelo CAD na análise de sobreposição. Verifica-se ainda uma concordância entre os modelos gráficos 3D obtidos pelo levantamento de formas e os resultados da análise dimensional da Tabela 13 <sup>28</sup>. Tal correlação pode ser observada uma vez que as direções críticas Y e Z — com erros dimensionais médios de aproximadamente +0,57 mm e +0,59 mm,

<sup>26</sup> A condição 3 foi selecionada para a análise de levantamento de forma, uma vez que quando comparada com a condição 4 (segunda condição com maiores desvios), apresentou-se mais crítica em duas direções, isto é, X e Y.

<sup>27</sup> Calculada a partir da relação entre o volume teórico das peças e a densidade do PLA — ~1,25 g/cm<sup>3</sup> (HENTON *et al.*, 2005; SANTANA *et al.*, 2016).

<sup>28</sup> Ressalta-se, porém, que considerações devem ser realizadas para associar as duas análises. Na medição por contato (micrômetro) se tem uma maior área de abrangência e, portanto, maior aproximação dos resultados da medição. Salienta-se ainda que os resultados da Tabela 13 e 17 correspondem à “média das médias”, ou seja, o valor médio das dimensões em cada condição integra a média das três medições por direção em cada uma das três peças fabricadas. Já a medição com o modelo digitalizado é mais criteriosa, uma vez que se pode observar desvios pontualmente

respectivamente — são as faces com maior predominância de áreas em cinza na justaposição dos modelos 3D, com destaque para a representação da Figura 66 (b).

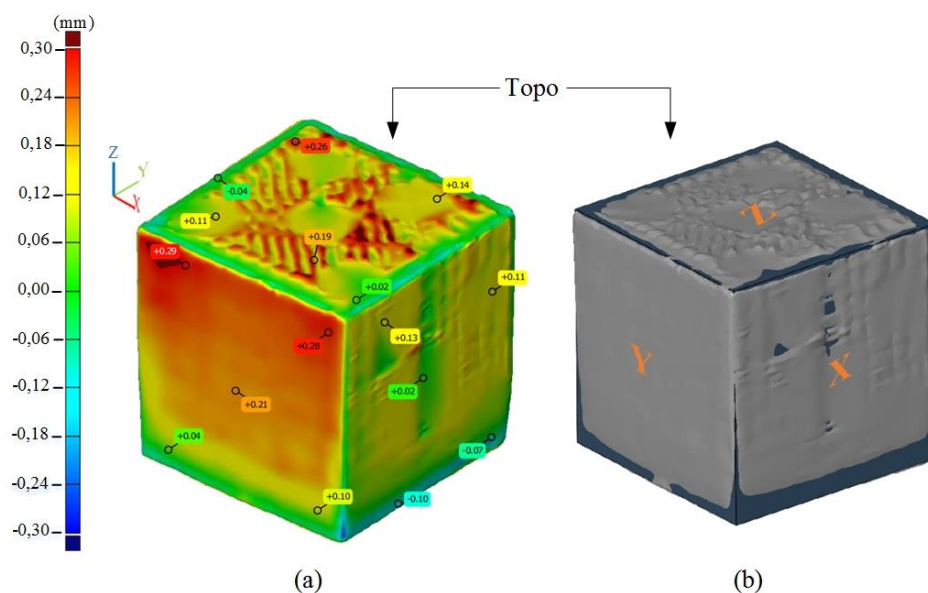


Figura 65 – Desvios dimensionais (a) e sobreposição entre modelos CAD e digitalizado (b), amostra com  $P_p=100\%$ ; referência “Topo” (Condição 3) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

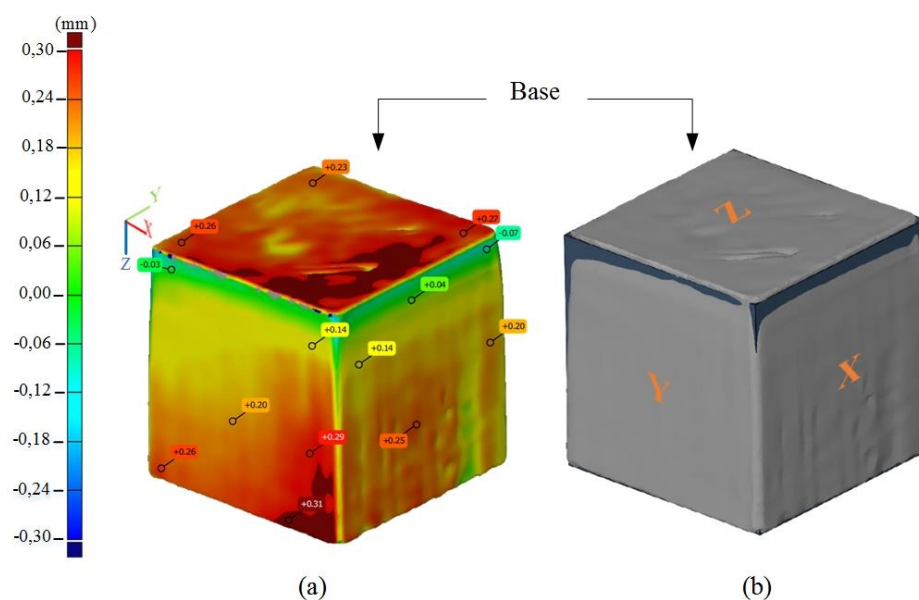


Figura 66 – Desvios dimensionais (a) e sobreposição entre modelos CAD e digitalizado (b), amostra com  $P_p=100\%$ ; referência “Base” (Condição 3) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Em relação à situação destacada anteriormente (Base), notam-se na Figura 66 (a) desvios dimensionais pontuais entre (+0,26 a +0,31) mm em Y e de (+0,23 a +0,27) mm em Z. Já para

a vista orientada pelo Topo — Figura 65 (a) —, os desvios em Y e Z foram respectivamente em intervalos de (+0,04 a +0,29) mm e (-0,04 a +0,26) mm.

Os mesmos padrões de análise aplicados ao modelo digitalizado da peça fabricada com 100% foram adotados para uma amostra com 20%. Neste caso, foi selecionada uma peça resultante da combinação de parâmetros da condição 1. Confrontando as duas imagens da Figura 67 (a) e (b) foi possível identificar alguma proximidade geométrica e dimensional entre os dois modelos, CAD e digitalizado. Os resultados confirmam ainda as respostas apresentadas na Tabela 13 para a condição 1, em que a direção Y foi a situação mais crítica, no sentido de aumento das dimensões da peça em relação ao valor nominal. Tal efeito é representado pelos desvios dimensionais positivos da Figura 67 (a), e pela maior extensão da área em cinza — Figura 67 (b) — para Y em comparação aos eixos X e Z.

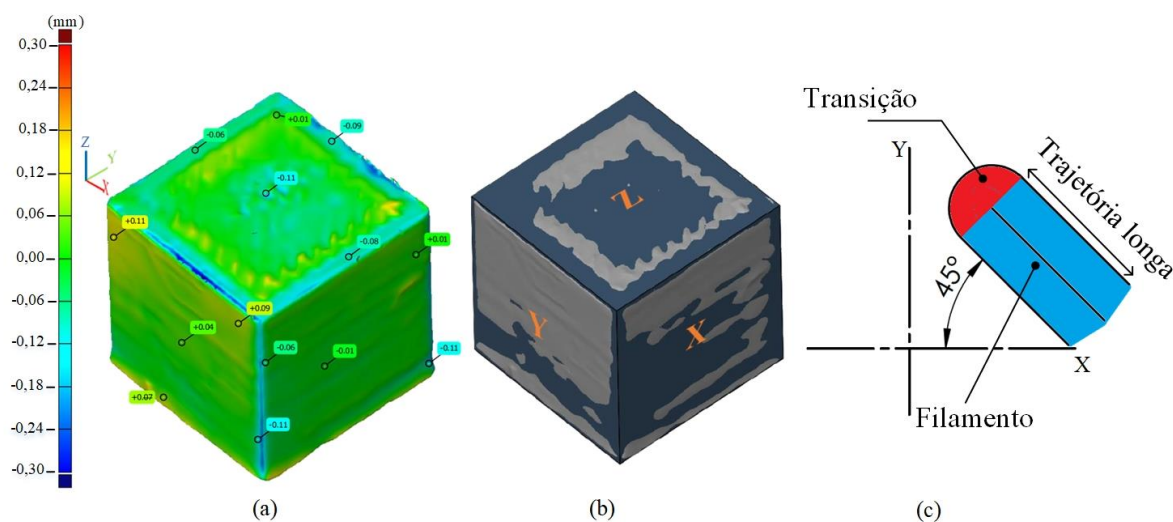


Figura 67 – Desvios dimensionais (a), sobreposição entre modelos CAD e digitalizado (b), amostra com Pp=20% (Condição 1) e (c) transição entre trajetórias (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

As distorções dimensionais observadas na Figura 67 (a) e (b) podem ter sido causadas por efeitos como o inchamento do polímero, fluidez do material, ou mesmo instabilidades no controle de alimentação do filamento durante a construção da amostra, uma vez que as peças com 20% de Pp não foram influenciadas pelo excesso de material gerado na fase de planejamento, ou fatiamento, dos modelos. Ainda sobre a peça em análise, observa-se que no eixo Z, Figura 67 (b), o modelo digitalizado ultrapassa os limites do CAD na região entre o contorno e o preenchimento. No local de interface ocorre a transição entre duas trajetórias de



preenchimento, e nestes pontos o Slic3r aplica vazões volumétricas<sup>29</sup> entre 2,722 mm<sup>3</sup>/s e 2,727 mm<sup>3</sup>/s, que são valores muito próximos aos aplicados em caminhos mais longos do preenchimento — Figura 67 (c). Em síntese, uma pequena trajetória de transição com um elevado volume de material não permite a acomodação adequada do extrudado. É importante ressaltar que as últimas camadas do modelo são 100% preenchidas.

Para finalizar as discussões sobre o percentual de preenchimento, destaca-se a forte correlação estatística positiva em X, Y e Z, (Tabela 14) confirmando que à medida que o percentual de preenchimento aumenta, neste estudo de 20% para 100%, as dimensões da peça tendem a crescer em todas as direções. No gráfico de dispersão da Figura 68 este comportamento é representado para a direção Z, na qual a característica foi mais relevante.

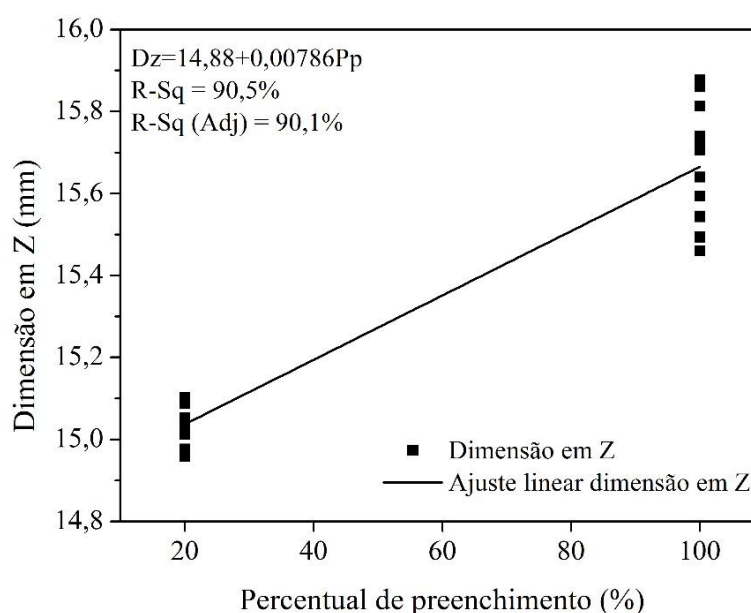


Figura 68 – Análise de regressão linear para o eixo Z: gráfico de dispersão (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

A última etapa de avaliação do experimento 1 analisou os efeitos dos fatores e níveis sobre a medição da massa e do volume das amostras. As variações de massa (Tabela 15) foram influenciadas principalmente pelo percentual de preenchimento — o que é evidente pelos valores de 20% e 100% de preenchimento abordados neste estudo — mas também pelo *software* de fatiamento, efeitos estes que se completam devido aos cálculos sobre a quantidade de material a ser alimentado, já discutidos anteriormente.

<sup>29</sup> Valores calculados a partir do Gcode.

Outros parâmetros que também influenciaram na massa foram a espessura de camada e a velocidade de deposição, responsáveis pelo controle do fluxo de material (volume), conforme descrito por Agarwala *et al.* (1996) (Tabela 16). O volume médio (Tabela 15), por sua vez, foi alterado tanto pelos parâmetros significativos para a análise dimensional quanto para os da massa média (Tabela 16). O comportamento médio da massa e do volume, em relação aos parâmetros significativos e seus níveis, é apresentado na Figura 69 (a) e (b).

Tabela 16 – Análise de variância ( $\alpha=95\%$ ) para massa (g) e volume ( $\text{mm}^3$ ) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

ANOVA “Massa”						
Fatores	$D_f$	$SQ$	$V$	$F$	$P$	$P\%$
$E_c$	1	0,018	0,018	15,9	0,0008	0,06
$P_p$	1	27,875	27,875	24125,2	0,0001	98,16
$V_{pc}$	(1)	(0,002)	Pooled			
$V_p$	1	0,249	0,249	215,6	0,0001	0,87
$V_{pe}$	(1)	(0,000)	Pooled			
$S_f$	1	0,231	0,231	200,0	0,0001	0,81
Erro	19	0,022	0,0012	1,0		0,09
Total	23					100

ANOVA “Volume”						
Fatores	$D_f$	$SQ$	$V$	$F$	$P$	$P\%$
$E_c$	1	2331,04	2331,04	4,91	0,0408	0,33
$P_p$	1	516548,87	516548,87	1088,16	0,0001	92,01
$V_{pc}$	1	5647,04	5647,04	11,90	0,0031	0,92
$V_p$	1	14398,13	14398,13	30,33	0,0001	2,48
$V_{pe}$	1	6870,28	6870,28	14,47	0,0014	1,14
$S_f$	1	7016,74	7016,74	14,78	0,0013	1,17
Erro	17	8069,92	8069,92	1,00		1,95
Total	23					100

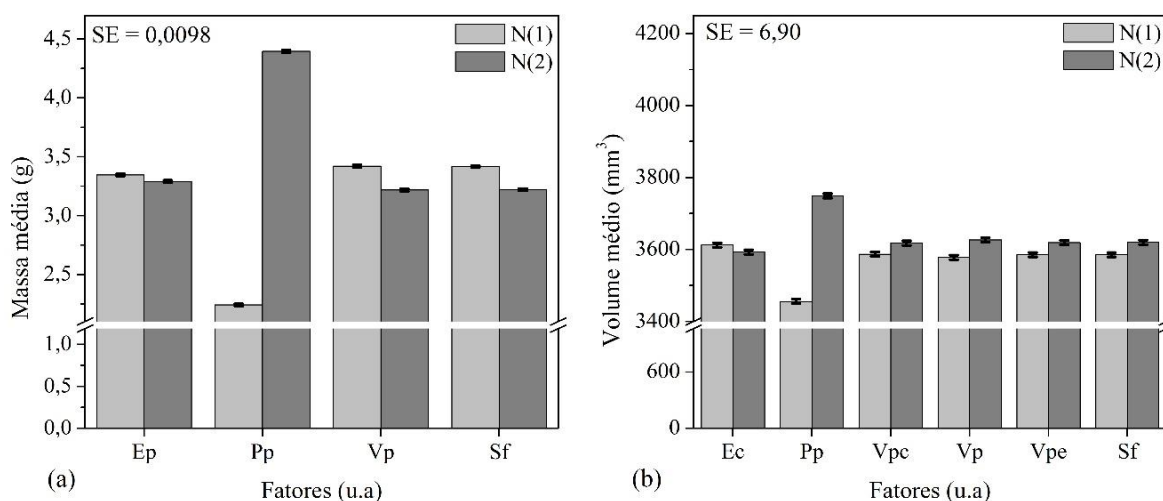


Figura 69 – Massa e volume médio em relação aos parâmetros significativos e seus níveis (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).



## 3.2.2.2 Etapa 2

Os resultados apresentados na Tabela 17 correspondem à média das dimensões X, Y e Z das amostras fabricadas na segunda parte do estudo. Assim como na parte 1, as respostas obtidas foram avaliadas pelo método da análise de variância (Tabela 18), o qual demonstrou que o multiplicador de extrusão foi o único parâmetro significativo para as variações dimensionais nas três direções principais das peças.

Tabela 17 – Resultados da análise dimensional das peças produzidas na segunda etapa experimental (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Conditions	Dimensions for X (mm)		Dimensions for Y (mm)		Dimensions for Z (mm)	
	<i>Média</i>	<i>E<sub>dm</sub></i>	<i>Média</i>	<i>E<sub>dm</sub></i>	<i>Média</i>	<i>E<sub>dm</sub></i>
1	14,51 ± 0,04	-0,49	14,55 ± 0,06	-0,45	15,05 ± 0,03	0,05
2	15,01 ± 0,03	0,01	15,08 ± 0,03	0,08	15,33 ± 0,09	0,33
3	14,49 ± 0,01	-0,51	14,57 ± 0,04	-0,43	15,10 ± 0,07	0,10
4	15,53 ± 0,05	0,53	15,60 ± 0,03	0,60	16,13 ± 0,07	1,13
5	15,02 ± 0,02	0,02	15,10 ± 0,01	0,10	15,33 ± 0,20	0,33
6	14,51 ± 0,08	-0,49	14,64 ± 0,03	-0,36	15,06 ± 0,06	0,06
7	15,46 ± 0,16	0,46	15,58 ± 0,17	0,58	15,91 ± 0,11	0,91
8	15,50 ± 0,08	0,50	15,59 ± 0,06	0,59	16,10 ± 0,11	1,10
9	15,03 ± 0,07	0,03	15,10 ± 0,05	0,10	15,43 ± 0,03	0,43

Tabela 18 – Análises estatísticas para as respostas avaliadas na segunda etapa experimental (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Fatores	<i>D<sub>f</sub></i>	<i>SQ</i>	ANOVA “Direção X”			
			<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>P%</i>
M <sub>e</sub>	2	4,41	2,205	497,66	0,0001	97,45
T <sub>e</sub>	(2)	(0,003)	<i>Pooled</i>			
T <sub>e</sub> *M <sub>e</sub>	(4)	(0,006)	<i>Pooled</i>			
<i>Erro</i>	24	0,11				2,55
<i>Total</i>	26					100
Fatores	<i>D<sub>f</sub></i>	<i>SQ</i>	ANOVA “Direção Y”			
			<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>P%</i>
M <sub>e</sub>	2	4,52	2,259	509,86	0,0001	97,58
T <sub>e</sub>	(2)	(0,007)	<i>Pooled</i>			
T <sub>e</sub> *M <sub>e</sub>	(4)	(0,007)	<i>Pooled</i>			
<i>Erro</i>	24	0,10	0,004	0,97		2,42
<i>Total</i>	26					100
Fatores	<i>D<sub>f</sub></i>	<i>SQ</i>	ANOVA “Direção Z”			
			<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>P%</i>
M <sub>e</sub>	2	4,53	2,266	233,84	0,0001	93,69
T <sub>e</sub>	2	0,067	0,033	3,44	0,054	0,98
T <sub>e</sub> *M <sub>e</sub>	4	0,043	0,011	1,11	0,382	0,09
<i>Erro</i>	18	0,17	0,010	1,00		5,23
<i>Total</i>	26					100

Continua

Tabela 18 – Análises estatísticas para as respostas avaliadas na segunda etapa experimental (Continuação)  
(adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

ANOVA “Volume”						
Fatores	$D_f$	$SQ$	$V$	$F$	$P$	$P\%$
$M_e$	2	2145829	1072914,3	456,28	0,0001	97,22
$T_e$	(2)	(7862)	<i>Pooled</i>			
$T_e * M_e$	(4)	(4555)	<i>Pooled</i>			
<i>Erro</i>	24	56435	2351,445	1,00		2,78
<i>Total</i>	26					100

ANOVA “Massa”						
Fatores	$D_f$	$SQ$	$V$	$F$	$P$	$P\%$
$M_e$	2	23,88	11,942	11913,23	0,0001	99,84
$T_e$	2	0,013	0,007	6,54	0,006	0,05
$T_e * M_e$	(4)	(0,005)	<i>Pooled</i>			
<i>Erro</i>	22		0,001	1,00		0,11
<i>Total</i>	26					100

Análise de correlação para as dimensões						
Fatores	Direção X		Direção Y		Direção Z	
	$C_c$	P	$C_c$	P	$C_c$	P
$M_e$	0,940	0,000	0,936	0,000	0,821	0,000
$T_e$	0,027	0,893	0,028	0,889	0,117	0,561

Em síntese, as dimensões X, Y e Z dos cubos apresentaram uma tendência de crescimento em relação ao valor projetado de 15 mm entre as configurações do menor (0,5) para o maior (1) nível de multiplicador de extrusão avaliado. O comportamento descrito pode ser observado no gráfico de médias para as três direções — Figura 70 (a) — e nos resultados da Tabela 17. A relação diretamente proporcional entre multiplicador de extrusão e as dimensões das peças é confirmada também pela análise de correlação forte positiva em X, Y e Z (Tabela 18), e ilustrada no gráfico de dispersão (para a direção X) da Figura 70 (b).

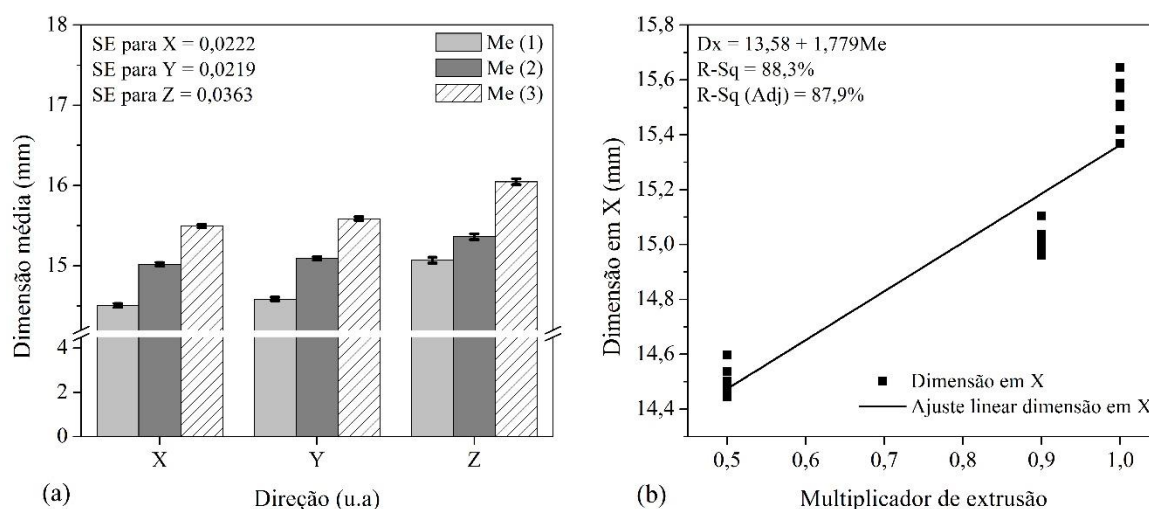


Figura 70 – Variação dimensional por direção em função de  $M_e$  e níveis (a) e (b) gráfico de dispersão para direção X (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Com base nos dados apresentados na Figura 70 (a), verificou-se que o ajuste do multiplicador de extrusão em 0,9 gerou os melhores resultados, isto é, mais próximos ao valor de 15 mm para as direções X e Y. A condição experimental 2 (Tabela 17) é a que melhor exemplifica este comportamento, uma vez que registrou a menor diferença absoluta entre todas as condições, e especialmente entre as que compartilhavam o mesmo valor de  $M_e$ . Os erros médios em X e Y para esta condição foram de aproximadamente +0,01 mm (+0,04%) e +0,08 mm (+0,51%).

Ainda sobre os resultados da Figura 70 (a), para a direção Z os valores mais adequados ao projetado foram obtidos com o ajuste de  $M_e$  igual a 0,5. Assim como no caso anterior (para  $M_e=0,9$ ), foi possível identificar entre as condições com multiplicador de 0,5 a que teve o melhor aproveitamento quanto a diferença absoluta para Z, especificamente a condição 1 (Tabela 17), com um erro de +0,05 mm (+0,36%). No entanto, para a mesma condição — assim como para as demais com o mesmo nível associado ao parâmetro — as direções X e Y apresentaram valores dimensionais médios muito abaixo ao do modelo CAD, em torno de -0,49 mm (-3,25%) e -0,45 mm (-2,97%) respectivamente. Para ilustrar esse comportamento, foi selecionada uma amostra da condição 1 para a análise de levantamento de formas, conforme mostrado na Figura 71 (a) e (b).

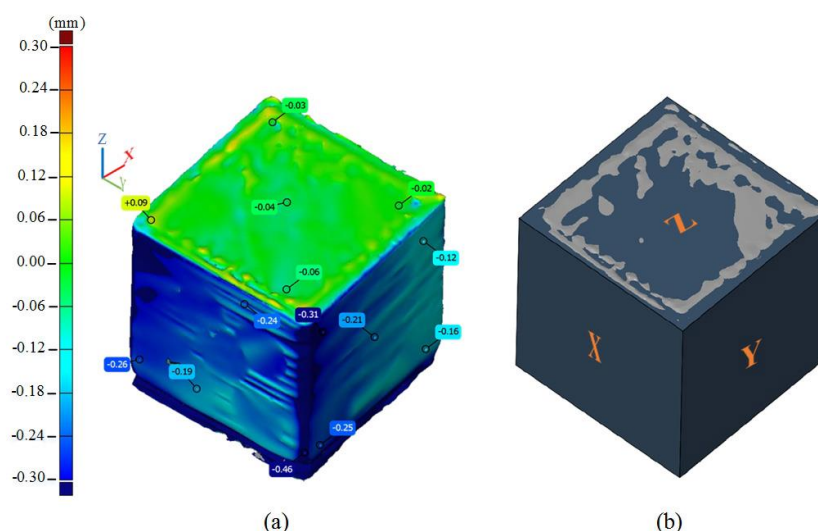


Figura 71 – Escaneamento 3D para amostra com  $M_e$  igual a 0,5: (a) desvios dimensionais e (b) sobreposição de modelos (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

As informações da digitalização 3D ressaltam a redução das dimensões da peça em relação ao projeto CAD para X e Y, através da predominância de desvios dimensionais negativos — Figura 71 (a). Tais desvios, considerando-se as faces em destaque na imagem,

foram respectivamente em intervalos de (-0,46 a - 0,19) mm e (-0,25 a -0,12) mm para X e Y. A Figura 71 (b) complementa ainda a análise de forma, pois observa-se que o modelo CAD se sobressai totalmente nas faces para X e Y, havendo apenas algumas regiões em Z em que elemento fabricado ultrapassa as fronteiras do projeto 3D.

Outro importante efeito constatado em relação ao uso do multiplicador de extrusão em 0,5 foi a fraca, ou ausente, adesão entre os filamentos depositados, resultando no desprendimento dessas estruturas ao longo das camadas (Figura 72). A característica foi associada ao baixo fluxo de material — 50% menor do que o volume de extrusão em um sistema estável a 100% — o qual gerou filamentos muito finos e com pouco molhamento nas direções entre e dentro das camadas.

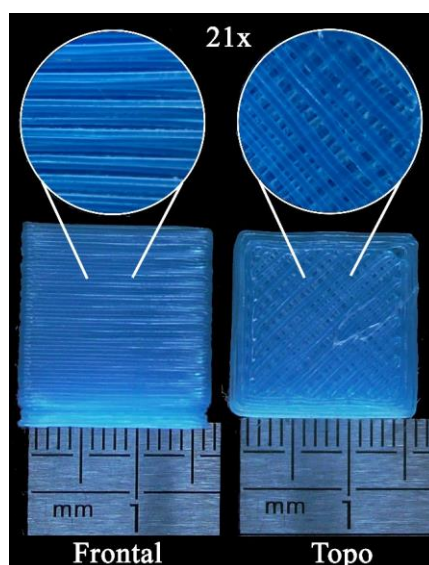


Figura 72 – Filamentos finos e ausência de adesão entre os mesmos (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Finalizando a análise dimensional das peças fabricadas na segunda etapa experimental, os resultados críticos, ou seja, com maior dispersão em torno do valor alvo de 15 mm para a geometria cúbica, foram atribuídos ao multiplicador de extrusão configurado em 1. Concorda-se, portanto, com o cenário apresentado na primeira parte do estudo para peças com 100% de preenchimento, uma vez que  $M_e$  igual a 1 corresponde ao valor *default* dos *softwares* de fatiamento. Assim como nas discussões anteriores, uma condição com o nível de  $M_e$  em análise destacou-se em relação às demais com o mesmo valor associado ao parâmetro: a condição 4. As dimensões médias das peças fabricadas nesta condição foram aproximadamente 3,5% maiores do que as da condição 2 em X e Y, e de 7,2% superior às da condição 1 em Z.

Ao se comparar por análise de digitalização 3D uma peça fabricada com a condição 2 ( $M_e=0,9$ ) com uma construída com a 4 ( $M_e$ ) verificou-se um aumento significativo de regiões com desvios dimensionais positivos em relação ao projeto CAD, de 2 para 4. A característica descrita pode ser observada na Figura 73 (a) e (b), respectivamente condições 2 e 4.

Visualmente, as superfícies das peças fabricadas com 100% de preenchimento e multiplicador de extrusão igual a 1 retratam claramente a instabilidade no fluxo de material depositado. Basicamente as faces dos cubos com tal configuração apresentaram um aspecto “enrugado”, alternando em uma mesma camada regiões com excesso, em forma de gotas, e filamentos finos, como se o material estivesse esticado. O efeito contribuiu para as variações dimensionais identificadas no estudo. Para retratar a situação foi construída uma amostra com o ajuste paramétrico crítico citado anteriormente e com o dobro da dimensão dos cubos avaliados neste trabalho, conforme mostrado na Figura 74 (a) e (b).

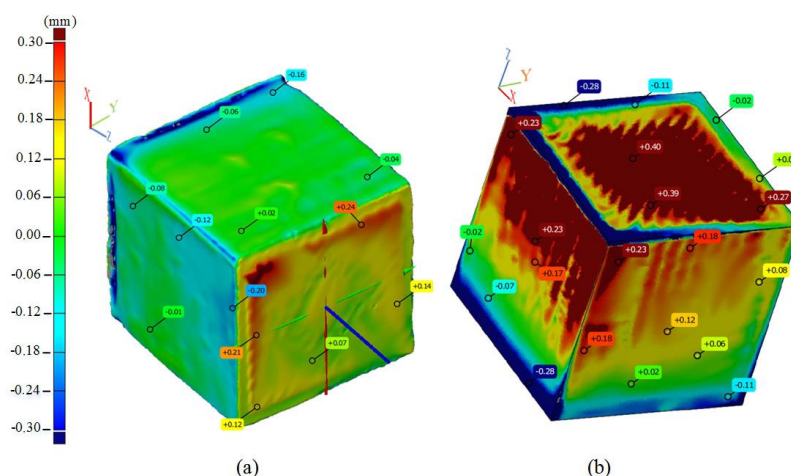


Figura 73 – Escaneamento 3D e desvios dimensionais: (a) amostra com  $M_e=0,9$  e (b)  $M_e=1$  (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

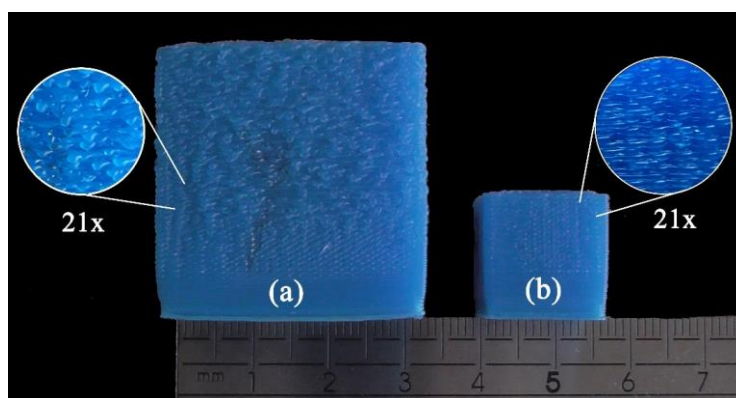


Figura 74 – Aspecto das superfícies, (a) peça em escala aumentada e (b) amostra experimental (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

A análise das massas contribuiu para enfatizar a influência do multiplicador nas propriedades finais das peças fabricadas. Assim como na parte 1, verificou-se, a partir do Gcode, a quantidade de material calculada pelo *software* de fatiamento (Slic3r) para a construção das amostras em cada uma das condições experimentais. A partir desse procedimento, constatou-se que o volume de material a ser depositado, e por consequência a massa, aumenta em função do uso de maiores valores de  $M_e$ , resultando nas maiores ou menores variações dimensionais. Ainda sobre a análise descrita, mais uma vez identificou-se uma proximidade entre os valores de massa calculados a partir do código de construção e a média das massas medidas das peças — Figura 75 (a). Novamente, um importante paralelo pode ser estabelecido entre a relação massa real e o volume medido das amostras (Tabela 19), evidenciando uma relação proporcional entre as duas repostas — Figura 75 (b).

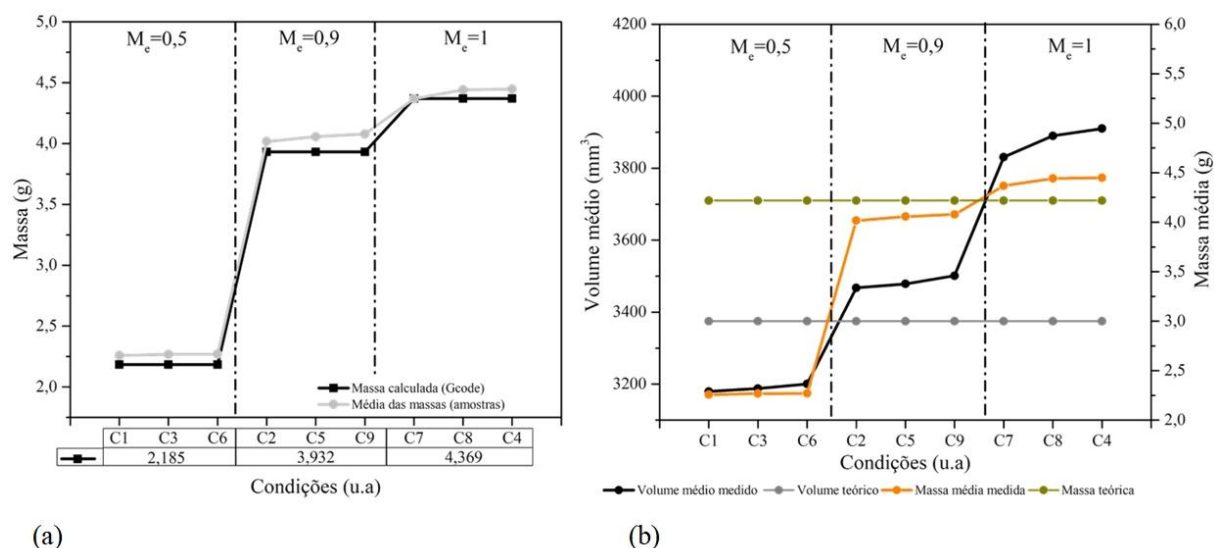


Figura 75 – Massa calculada a partir do Gcode versus a massa média medida (a), e relação massa volume (b); estudo parte 2 (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Tabela 19 – Massa e volume medidos, amostras do segundo experimento (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

Conditions	Mass (g)		Volume (mm <sup>3</sup> )	
	<i>Média</i>	<i>D<sub>f</sub></i>	<i>Média</i>	<i>E<sub>ym</sub></i>
1	2,26 ± 0,03	-1,96	3179,5 ± 27,81	-195,47
2	4,02 ± 0,04	-0,20	3467,5 ± 7,59	92,51
3	2,27 ± 0,02	-1,95	3187,8 ± 18,42	-187,21
4	4,45 ± 0,03	0,23	3910,2 ± 35,73	535,20
5	4,06 ± 0,02	-0,16	3478,6 ± 49,33	103,64
6	2,27 ± 0,02	-1,95	3200,4 ± 19,48	-174,62
7	4,37 ± 0,05	0,15	3831,6 ± 109,50	456,60
8	4,44 ± 0,03	0,22	3890,0 ± 59,86	515,04
9	4,08 ± 0,03	-0,14	3501,1 ± 34,28	126,12

Em outras palavras, quando se utilizou um multiplicador de extrusão igual a 1 (maior valor), o *software*, assim como na etapa 1, estipulou uma quantidade de material a ser alimentado superior à necessária para construir uma peça com as dimensões nominais (15x15x15 mm) em PLA. Ao “forçar” a construção das amostras com um volume de extrudado superior ao valor teórico, houve crescimento das dimensões das amostras e instabilidade do fluxo de material, causando o efeito de “*over extrusion*” nas superfícies das peças (Figura 74). Por outro lado, ao tentar fabricar peças 100% preenchidas com uma quantidade de material inferior à exigida ( $M_e=0,5$ ), as dimensões foram reduzidas (principalmente em X e Y) visando a “compactação dos filamentos”, ocasionando, no entanto, um baixo fluxo de extrusão. O multiplicador em 0,9 surgiu como um ponto de equilíbrio entre os extremos apresentados.

Nas condições com maior conformidade dimensional para as direções X, Y e Z em torno do valor projetado (15 mm), ou seja, para  $M_e$  igual a 0,9, o volume das peças (Tabela 19) variou em menor escala em relação ao valor teórico (3375 mm<sup>3</sup>), gerando uma massa média de 4,05 g, menor que a massa teórica, porém mais condizente com as características do processo de fabricação. Tal comportamento, seguindo a filosofia apresentada anteriormente, foi atribuído a um fluxo de material mais estável durante a deposição das camadas.

Por fim, foram avaliadas as influências dos fatores sobre as variações de massa e volume das peças. Apesar da influência significativa da temperatura de extrusão sobre a variação da massa, conforme a análise de variância —Tabela 18—, a contribuição do fator (~ 0,05%) é muito pequena quando comparada à do multiplicador de extrusão (~ 99,84%). Na Figura 76 (a) é apresentada a variação da massa em relação aos parâmetros e níveis.

Relativamente ao valor médio da massa, considerando os valores extremos de  $M_e$ , quando comparado com a massa teórica (4,22 g), variou entre -46,3% (~ 2,27 g) para  $M_e$  igual a 0,5 e +4,8 % (~ 4,42 g) para  $M_e$  em 1. Seguindo as observações da primeira etapa, foi possível relacionar a variação da massa com a quantidade de material depositado, isto é, em excesso quando o multiplicador de extrusão foi ajustado em 1 — visto que a massa das amostras superou o valor teórico, considerando novamente a presença de vazios naturais do processo — e em escassez quando para uma configuração de 0,5. O volume das amostras foi influenciado exclusivamente pelo multiplicador de extrusão, Tabela 18, o comportamento médio em função dos níveis de  $M_e$  é apresentado na Figura 76 (b).



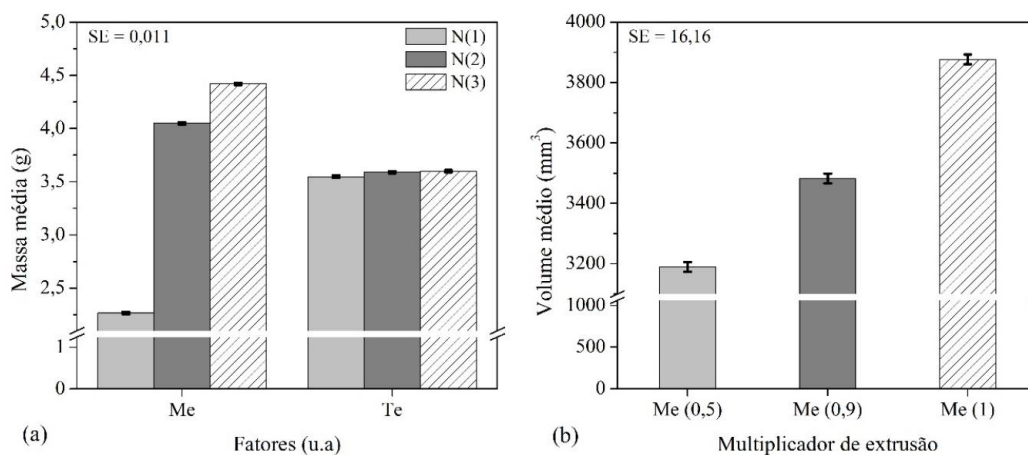


Figura 76 – Variação das respostas em relação aos parâmetros significativos e níveis: (a) massa e (b) volume (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

### 3.2.3 Metodologia para calibração paramétrica

Neste último tópico do estudo, buscou-se sintetizar o conteúdo do trabalho em um procedimento experimental para a calibração paramétrica. Trata-se, portanto, de um método generalista que pode ser utilizado em muitos cenários de Impressão 3D de baixo custo. É importante destacar que o procedimento de calibração é um estudo preliminar, com o objetivo de estabilizar uma configuração base para os parâmetros de entrada, ajudar na escolha do *software* de fatiamento e auxiliar na identificação das causas de erros no processo de fabricação. Sendo uma etapa preliminar, esta precede estudos de “otimização paramétrica”, os quais têm o intuito de melhorar, por exemplo, a construção de uma geometria complexa ou de uma peça para uso final.

Sugere-se para tal procedimento o uso de uma geometria simples, como o cubo utilizado, visando facilitar as etapas de medição, visualização e interpretação dos efeitos das diferentes configurações testadas, nos aspectos qualitativos das peças. As diretrizes para o procedimento de calibração são descritas a seguir e sintetizadas na Figura 77:

- (1) **Definir as respostas:** o usuário deve estabelecer um critério sobre o qual a influência dos fatores envolvidos no processo calibração deve ser avaliada, além de definir as metas a serem atingidas com o procedimento. “Neste estudo, o aspecto dimensional foi selecionado como critério de qualidade e as metas foram: (i) definir as causas dos erros dimensionais, (ii) selecionar o melhor software de fatiamento e encontrar uma configuração paramétrica que gerasse a menor diferença absoluta entre as dimensões projetadas para uma peça e as obtidas nas amostras impressas”;



- (2) **Selecionar os fatores e níveis:** esta etapa é baseada nos fatores de influência na resposta estabelecida em (1), os quais devem ser determinados a partir da revisão da literatura, dos parâmetros de entrada do *software* de fatiamento utilizado, das características gerais da impressora 3D (exemplo, diâmetro do bico), das propriedades do material de impressão (temperaturas de processamento, tendência de empenamento, adesão a plataforma de construção, entre outras). *“Relembrando: os parâmetros de entrada são aqueles que inevitavelmente precisam ser configurados”*;
- (3) **Selecionar o método de delineamento experimental (DOE):** depende do número de variáveis e níveis estabelecidos em (2). *“Este foi o critério utilizado para a determinação dos métodos de DOE utilizados neste trabalho e pode ser utilizado por outros usuários”*. Para um maior número de variáveis e níveis, o método de Taguchi é sugerido. Para uma menor quantidade de fatores e níveis, o método Fatorial completo pode ser utilizado. Esses são dois exemplos de métodos de planejamento largamente aplicados, entretanto, outros podem ser encontrados na literatura especializada. *“Para ilustrar a seleção do método DOE, cita-se como exemplo a primeira etapa experimental deste trabalho, que foi baseada em seis fatores com dois níveis cada. Pelo método de Taguchi foram geradas oito condições (combinações de fatores) e se determinou que seriam realizadas três repetições para cada uma delas, gerando assim um total de 24 amostras. Nesta mesma situação, se fosse utilizado o método fatorial completo, teriam que ser construídas 192 amostras, o que implicaria em maiores tempos e custos para o estudo”*;
- (4) **Imprimir as amostras:** primeiramente, a máquina deve ser calibrada (nivelamento da base e dos eixos) e o funcionamento do sistema de extrusão deve ser verificado. Ao imprimir as amostras, os usuários devem ter o cuidado de fabricá-las individualmente, com o objetivo de garantir que cada peça seja construída nas mesmas condições de nivelamento e aquecimento da plataforma de construção;
- (5) **Analisar as amostras:** o usuário deve determinar um procedimento de medição (de acordo com o critério qualidade estudado) e manter uma sistemática de repetição nas medições. *“Neste estudo, por exemplo, as dimensões foram adquiridas por medição por contato (micrômetro) e análise por scanner 3D”*. Para complementar os procedimentos, devem ser aplicados métodos estatísticos para analisar os dados obtidos com as medições: medidas de dispersão, métodos de comparação de médias, análises de correlação e regressão, entre outras;

**(6) As respostas estão estabilizadas?** Neste momento o usuário deve verificar se seus objetivos foram alcançados: há uma variação mínima nas repostas encontradas em relação ao critério de qualidade estabelecido? Foi possível determinar as causas de erro? Se as respostas forem positivas, o processo pode ser finalizado. Caso contrário, as informações obtidas devem ser utilizadas para um novo processo de revisão da literatura, visando estabelecer novos fatores de influência a serem investigados.

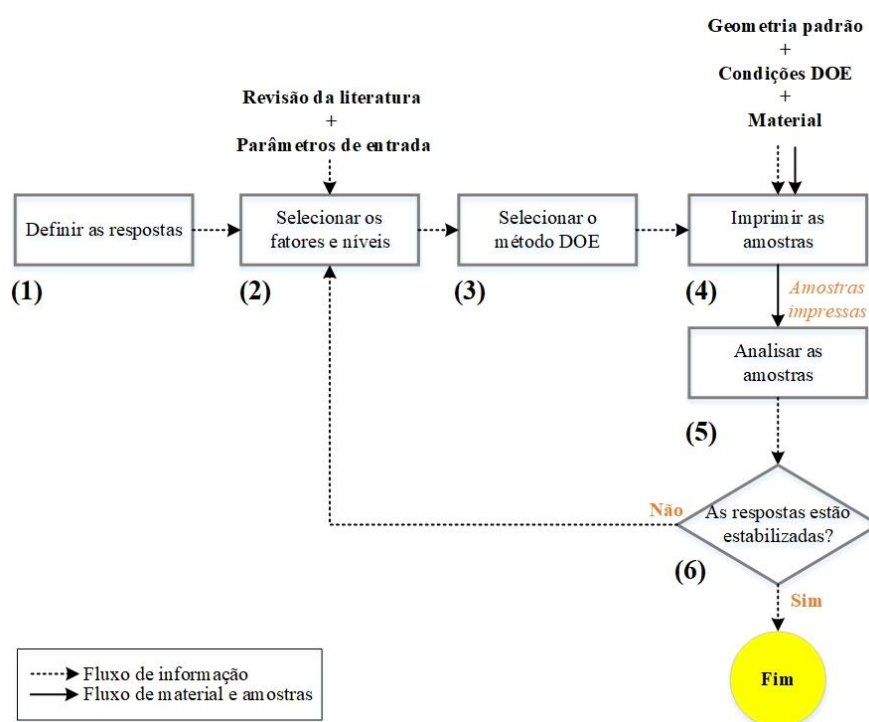


Figura 77 – Procedimento metodológico para o processo de calibração (adaptado de SANTANA *et al.*, 2017b).

### 3.2.4 Conclusões sobre a calibração paramétrica

A principal contribuição deste estudo de calibração foi estabelecer que as variações dimensionais nas peças fabricadas por Impressão 3D baseada em extrusão são uma função da quantidade de material depositado. Baixos percentuais de preenchimentos (como os 20% utilizados) melhoram a qualidade dimensional, por uma simples relação entre baixo volume de material a ser extrudado com maior liberdade para deposição e acomodação dos filamentos. Altos percentuais de preenchimento (100%), associados a um elevado fluxo de material ( $M_e=1$ ), reduzem a conformidade dimensional, pois excedem os limites geométricos e físicos de uma peça com volume teórico, através da sobre-extrusão de material aliada a um baixo nível de

acomodação dos filamentos depositados. A acomodação dos filamentos dentro e entre camadas interferiu na resolução de construção das peças.

A causa raiz para os problemas dimensionais identificados neste estudo foram os *softwares* de fatiamento e as estratégias utilizadas por estes no cálculo da quantidade de material a ser alimentado na fabricação das peças. O efeito do *software* não fica claramente evidenciado nas contribuições dos resultados estatísticos, pois o fator compete com as demais variáveis no planejamento experimental como um parâmetro de processo. Com a análise dos códigos gerados pelos fatiadores, verificou-se que na verdade o percentual de preenchimento, na primeira etapa, e o multiplicador de extrusão, na segunda etapa, evidenciam indiretamente a influência do *software* nas variações dimensionais.

O multiplicador de extrusão, neste estudo, surgiu como uma ferramenta que atuou nos cálculos realizados pelo *software* CAM, permitindo o controle da quantidade de material para a construção das peças e melhorando as propriedades dimensionais de peças com 100% de preenchimento. O crescimento no volume de material extrudado e a influência na integridade dos filamentos depositados, e por consequência nas dimensões das peças, evidenciado por Galantucci *et al.* (2015), também foi identificado no presente estudo. Porém, ao contrário dos autores, que relacionaram o fenômeno ao aumento da espessura de camada, nesta tese o efeito foi atribuído aos maiores níveis do multiplicador de extrusão associados a elevados percentuais de preenchimento.

Além da contribuição para os estudos dos autores citados anteriormente, o conteúdo desenvolvido nesta pesquisa colabora também com a investigação de Lanzotti *et al.* (2015b). Estes verificaram que, ao se aumentar o ajuste do fluxo de material em 5%, isto é, para 105%, melhorou-se a precisão dimensional, em oposição ao cenário observado no presente artigo, em que a maior conformidade das dimensões com o projeto original foi obtida reduzindo-se o multiplicador em 10% ( $M_e=0,9$ ). No entanto, é importante ressaltar que os autores utilizaram em seu estudo um filamento de PLA de 2,85 mm de diâmetro, diferentemente do utilizado neste artigo, com 1,75 mm.

A conhecida proporcionalidade entre massa e volume foi uma importante relação para as análises realizadas, uma vez que permitiu identificar os efeitos da deposição em demasia sobre as dimensões das peças. Sugere-se, então, seu uso como ferramenta de avaliação da qualidade, para usuários técnicos e não técnicos, uma vez que massa e volume são grandezas facilmente medidas. Para um mesmo volume teórico, a única evidência para que as peças impressas com 100% de preenchimento superassem a massa de um componente sólido teórico em PLA era o

excesso de material inserido na construção das peças, que por sua vez alterou o volume das mesmas, e assim as dimensões X, Y e Z. Em síntese, verificou-se que:

- (a) a velocidade de impressão é um parâmetro direcional, isto é, o melhor ajuste deve ser feito considerando as direções laterais (X e Y) e ao longo do eixo Z. Além disso, a velocidade interfere no volume de extrudado ( $\text{mm}^3/\text{s}$ ), filamento a filamento, e na capacidade de acomodação dos filamentos camada a camada. Por esses motivos, o uso de menores velocidades, em todas as direções da peça, melhora a qualidade dimensional;
- (b) diferentes *softwares* CAM interferem na precisão do fatiamento, para diferentes direções das peças, na quantidade de material a ser depositado e nos padrões de velocidade em função do ajuste do usuário;
- (c) a espessura de camada, neste estudo, não foi um fator significativo para a variação dimensional, opondo-se à literatura (SOOD *et al.*, 2009; NANCHARAI AH *et al.*, 2010). Entretanto, foram utilizados níveis muito próximos, 0,25 mm e 0,30 mm, e os efeitos do excesso de material podem ter interferido na atuação do parâmetro. O eixo Z, por exemplo, no qual classicamente a espessura de camada é um fator fundamental para a precisão dimensional, foi altamente influenciado pela sobre deposição de material, em conjunto com parâmetros como a velocidade de preenchimento em seu maior nível. Agora já reconhecida a estratégia para o ajuste da quantidade de material, sugerem-se novos experimentos com a espessura de camada;
- (d) menores valores de percentual de preenchimento tendem a reduzir os erros dimensionais. Contudo, para peças com 100% de preenchimento os resultados podem ser melhorados com o ajuste do multiplicador de extrusão.

Por fim, esta etapa do estudo busca alertar aos usuários, primeiramente, sobre a importância de se analisar os códigos de fabricação. Isto pode ser feito manualmente ou com ajuda de ferramentas como *softwares* de simulação CAM ou plataformas online. Em segundo lugar, ressalta a necessidade do ajuste e da verificação do fluxo de material antes da confecção das peças, protótipos ou não. Para tal, um modelo simples, como a estrutura cúbica utilizada, pode ser aplicado como padrão para a calibração paramétrica e os melhores níveis associados às variáveis de entrada, encontrados na presente pesquisa, podem ser utilizados como ponto de partida para o processo de otimização.

### 3.3 ANÁLISE DIMENSIONAL EM GEOMETRIAS VAZADAS

Este estudo é uma continuação do processo de calibração paramétrica, com base no critério da qualidade dimensional, iniciado na seção anterior. Além da análise de outros parâmetros de processo, esta etapa visa inserir novos materiais na pesquisa com o objetivo de selecionar filamentos poliméricos para a confecção e avaliação de conexões *snap-fit*. A partir dos conhecimentos desenvolvidos nesta seção foi elaborado um artigo para o 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação COBEF (2019) com o título: “*DIMENSIONAL ANALYSIS OF PLA AND PETG PARTS BUILT BY OPEN SOURCE EXTRUSION-BASED 3D PRINTING*”.

#### 3.3.1 Materiais e métodos

Neste tópico avaliou-se o comportamento das dimensões internas e externas de peças fabricadas pela tecnologia de Impressão 3D por extrusão, em função da variação de três fatores: estratégia de deposição ( $E_s$ ), número de perímetros ( $N_p$ ) — representados na Figura 78 (a) — e tipo de material ( $M_t$ ). Para cada um dos fatores foram estabelecidos três níveis (Tabela 20) e as condições experimentais foram determinadas através de um arranjo ortogonal L9 de Taguchi (Tabela 21). Os demais parâmetros de processo foram mantidos fixos (Tabela 20), em sua maioria, baseados no melhor ajuste encontrado em estudo anterior.

Tabela 20 – Fatores e níveis avaliados, e parâmetros fixos.

Fator	Nível 1	Nível 2	Nível 3
$E_d$	<i>Raster</i> (0°/90°)	<i>Raster</i> (45°/-45°)	Concêntrica
$N_p$	1	2	3
$M_t$	PLA (a)	PLA (b)	PETG
Parâmetros fixos		Ajuste	
Espessura de camada ( $E_c$ )		0,2 mm	
Percentual de preenchimento ( $P_p$ )		100%	
Orientação de construção		No plano	
Velocidades			
Primeira camada ( $V_{pc}$ )		15 mm/s	
Perímetros ( $V_{pe}$ )		20 mm/s	
Preenchimento ( $V_p$ )		40 mm/s	
Multiplicador de extrusão ( $M_e$ )		0,9	
Temperatura de extrusão (PLA, PETG)		210°C, 235°C	
Temperatura da base		70°C	

Tabela 21 – Planejamento experimental L9 de Taguchi, estudo das geometrias vazadas.

Condições	$E_d$	$N_p$	$M_t$
1	0°/90°	1	PLA (a)
2	0°/90°	2	PLA (n)
3	0°/90°	3	PETG
4	45°/-45°	1	PLA (n)
5	45°/-45°	2	PETG
6	45°/-45°	3	PLA (a)
7	Concêntrica	1	PETG
8	Concêntrica	2	PLA (a)
9	Concêntrica	3	PLA (n)

Três peças foram confeccionadas (individualmente) por combinação de fatores e níveis, em uma impressora 3D modelo *Prusa Hephestos I3*, gerando um total de 27 amostras. O planejamento do processo de impressão foi realizado no *software* Slic3r (versão 1.2.9). Uma geometria paralelepípedica com dimensões de (25x25x15) mm e uma cavidade cúbica de (15x15x15) mm foi utilizada como padrão para a análise, Figura 78 (b). Especialmente sobre os materiais, foram utilizados dois filamentos de Poli (Ácido Lático) (PLA) — um natural (transparente) do fornecedor *BQ*, “PLA (n)” e um pigmentado (azul), “PLA (a)”, do fabricante *3D INK* —, e um de Poli (tereftalato de etileno glicol) (PETG) (comercializado por *RepRap.pt*), todos com diâmetro teórico de 1,75 mm.

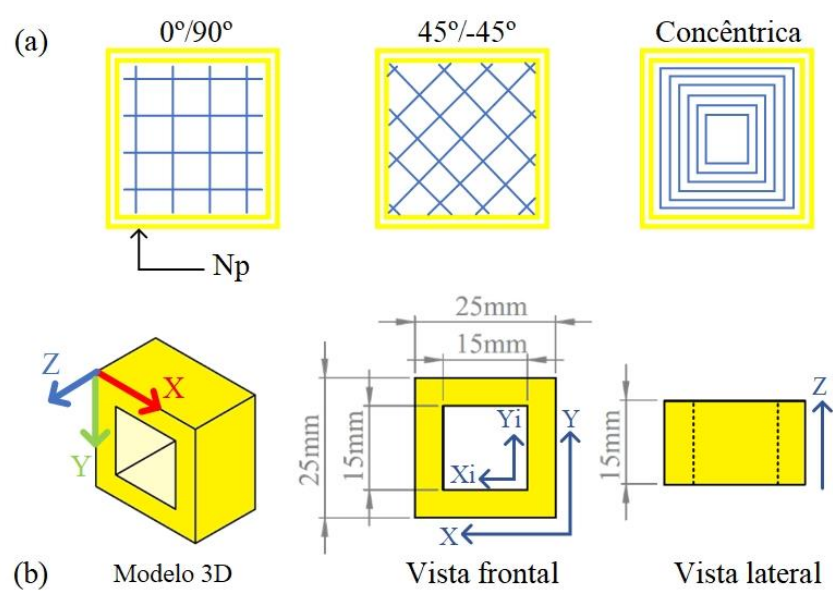


Figura 78 – Parâmetros do processo (a) e (b) geometria da amostra.

Em cada uma das direções principais da geometria, X e Y (internas e externas) e Z, foram realizadas três medições com o auxílio de micrômetros interno e externo (com resoluções de

0,025 mm e 0,0025 mm, respectivamente). A massa das amostras também foi medida (balança,  $d=0,005\text{g}$ ). Os materiais utilizados no trabalho foram caracterizados através de um ensaio de medição do índice de fluidez (MFI)<sup>30</sup>, em um equipamento *MFI Daventest*, aplicando uma carga de 2,16 kg, tempo de corte de 10s e temperaturas de 210°C para os PLAs e 235°C para o PETG; as temperaturas são as mesmas utilizadas no processo de Impressão 3D das amostras. Por fim, verificou-se ainda a variação do diâmetro do filamento antes de ser processado. Foram realizadas cinco medições ao longo de um comprimento de 200 mm de material, utilizando o mesmo micrômetro externo especificado anteriormente.

### 3.3.2 Resultados e discussões

Na Tabela 22 são apresentados os valores médios das dimensões por direção e condição experimental. Tais resultados foram avaliados pelo método da análise de variância (ANOVA,  $\alpha=95\%$ )<sup>31</sup>, com o objetivo de identificar os fatores significativos para a variação das dimensões internas e externas das peças. Através da ANOVA constatou-se que o tipo de material foi o fator com maior percentual de contribuição para alterações nas dimensões X (77,6%,  $P = 0,00$ ), Xi (71,4%,  $P = 0,00$ ), Y (67,8%,  $P = 0,00$ ), Yi (68,4%,  $P = 0,00$ ), e Z (51,6%,  $P = 0,00$ ), seguido pelo parâmetro “estratégia de deposição” com percentuais, na mesma ordem, de 10,3% ( $P=0,00$ ), 18,4% ( $P=0,00$ ), 17,3% ( $P=0,00$ ), 18,7% ( $P=0,00$ ), e 27,4% ( $P = 0,00$ ). O número de perímetros, em todos casos, não apresentou significância estatística. As médias das dimensões, por fatores e níveis, com os respectivos erros padrão ( $E_p$ ), são disponibilizadas nos gráficos da Figura 79 (a) e (b).

Tabela 22 – Resultados das medições externas e internas.

Condições	Dimensões médias por condições (mm)				
	X	Y	Z	Xi	Yi
1	24,75 $\pm$ 0,01	24,76 $\pm$ 0,01	15,01 $\pm$ 0,01	15,07 $\pm$ 0,00	15,04 $\pm$ 0,02
2	25,24 $\pm$ 0,02	25,28 $\pm$ 0,02	15,22 $\pm$ 0,03	14,64 $\pm$ 0,02	14,58 $\pm$ 0,08
3	24,81 $\pm$ 0,01	24,90 $\pm$ 0,01	14,89 $\pm$ 0,03	14,97 $\pm$ 0,00	14,93 $\pm$ 0,00
<b>4</b>	<b>25,49 <math>\pm</math> 0,02</b>	<b>25,65 <math>\pm</math> 0,04</b>	<b>15,53 <math>\pm</math> 0,03</b>	<b>14,28 <math>\pm</math> 0,00</b>	<b>14,19 <math>\pm</math> 0,06</b>
5	24,79 $\pm$ 0,02	24,86 $\pm$ 0,00	14,84 $\pm$ 0,02	14,95 $\pm$ 0,02	14,94 $\pm$ 0,02
6	24,89 $\pm$ 0,02	24,99 $\pm$ 0,01	15,33 $\pm$ 0,02	14,82 $\pm$ 0,01	14,73 $\pm$ 0,00
7	24,69 $\pm$ 0,02	24,66 $\pm$ 0,03	14,67 $\pm$ 0,02	15,08 $\pm$ 0,01	15,04 $\pm$ 0,01
<b>8</b>	<b>24,83 <math>\pm</math> 0,02</b>	<b>24,86 <math>\pm</math> 0,00</b>	<b>15,11 <math>\pm</math> 0,01</b>	<b>14,99 <math>\pm</math> 0,03</b>	<b>14,95 <math>\pm</math> 0,03</b>
9	25,05 $\pm$ 0,05	25,09 $\pm$ 0,03	14,92 $\pm$ 0,03	14,70 $\pm$ 0,05	14,66 $\pm$ 0,06

<sup>30</sup> O ensaio foi realizado no laboratório de polímeros da Universidade do Minho (Guimarães).

<sup>31</sup> Tabela ANOVA disponível no Apêndice A, juntamente com a análise de Tukey para os níveis dos fatores significativos.

O PLA natural, na maior parte dos casos, foi responsável pelas maiores dispersões nas dimensões em torno do valor nominal. O efeito pode estar relacionado às características de fluidez do material, o qual apresenta um índice —  $(22,24 \pm 2,22)$  g/10min — aproximadamente 49% e 51% maior que o do PLA (azul) —  $(14,95 \pm 0,55)$  g/10min — e do PETG —  $(14,70 \pm 1,29)$  g/10min —, respectivamente. A maior fluidez do “PLA n” é interessante para o processo de extrusão do polímero, no entanto, ao que indicam os resultados dimensionais, esse escoamento pode permanecer elevado enquanto os filamentos depositados se acomodam dentro e entre as camadas. Um maior tempo de estabilização para aumentar a viscosidade do material e garantir auto sustentação das estruturas depositadas faz com que os filamentos permaneçam a se deformar diante das pressões geradas pelo bico e pelos próprios filamentos vizinhos, gerando então distorções dimensionais em todas as direções das peças.

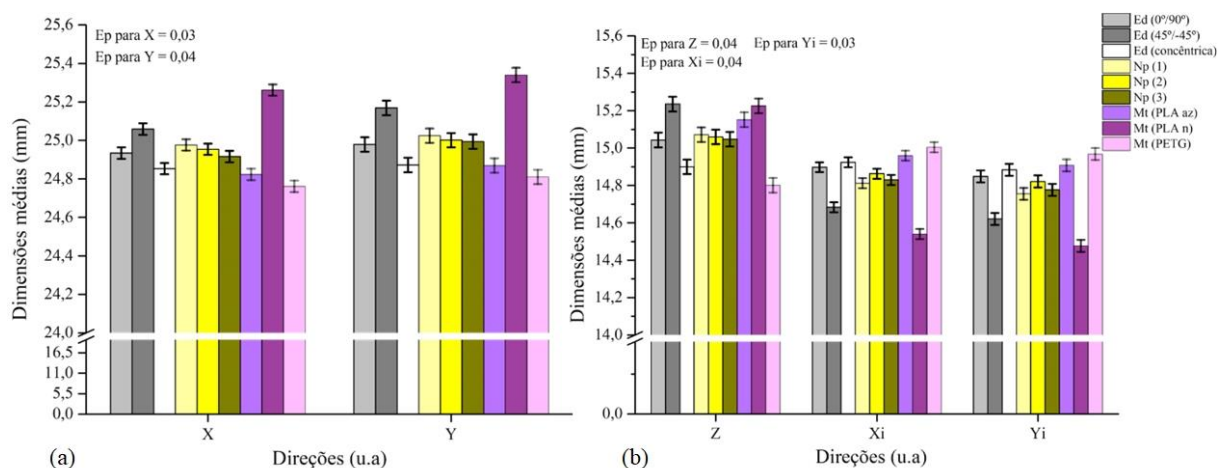


Figura 79 – Valores dimensionais médios por fatores e níveis, dimensões de 25 mm (a) e 15 mm (b).

Além da maior fluidez, o filamento de PLA natural apresentou uma variação no diâmetro, em torno de +0,03 mm, em relação ao valor nominal (comercial) de 1,75 mm. Uma vez que foi mantido o valor nominal nas configurações do Slic3r, o *software* não compensou a quantidade de material a ser depositada, tendo então as peças uma massa superior ao volume de matéria calculado, Figura 80 (a). A fluidez do polímero pode ter colaborado também para as maiores massas das peças em “PLA n”. A facilidade em ser extrudado combinada com efeitos semelhantes aos descritos por Gibson *et al.* (2015), como a presença de pressões internas no sistema de deposição, causadas pela própria massa de material amolecido e gases, pode ter colaborado para que porções excessivas de material tenham sido inseridas na construção das camadas.



O excesso de material, portanto, foi responsável pelo aumento das dimensões externas e redução das internas na maior parte das condições experimentais em que o “PLA n” esteve presente, com destaque para a combinação paramétrica 4 (Tabela 22), na qual se observou claramente esses efeitos na superfície das peças, com aspecto enrugado, e com a formação de gotas de material residual e deformações nas bordas da peça, Figura 80 (b). A situação é semelhante aos conceitos descritos no estudo de calibração paramétrica da seção 3.2.

As peças fabricadas em PETG e “PLA a” apresentaram, de acordo com o teste de Tukey, igualdade estatística nas direções X, Xi, Y e Yi, diferenciando-se apenas nas dimensões do eixo Z, nas quais o PETG demonstrou os melhores resultados. O comportamento de semelhança entre os materiais possivelmente está relacionado à proximidade entre a fluidez dos mesmos, com uma diferença de apenas +2% do índice do PLA azul para o do PETG. Dadas as exceções, as peças fabricadas com esses materiais foram as que mais se aproximaram dos valores projetados para as amostras, Tabela 22. Seguindo o raciocínio anterior, as melhores repostas podem estar associadas à baixa fluidez dos materiais, que colabora para uma estabilização de forma mais rápida dos elementos depositados, e ao menor diâmetro dos filamentos,  $1,73 \pm 0,00$  mm para o “PLA a” e  $1,69 \pm 0,01$  mm para o PETG, que associado ao melhor ajuste do multiplicador de extrusão identificado no estudo anterior (seção 3.2) ( $Me = 0,9$ ), garantiu que as peças fabricadas não apresentassem massas exageradas quando comparadas à quantidade de material a ser depositado, calculada pelo Slic3r — Figura 80 (a). O ajuste na quantidade de material confere melhores resultados no aspecto dimensional, uma vez que o volume de matéria depositada não supera os limites físicos do volume real do modelo a ser fabricado.

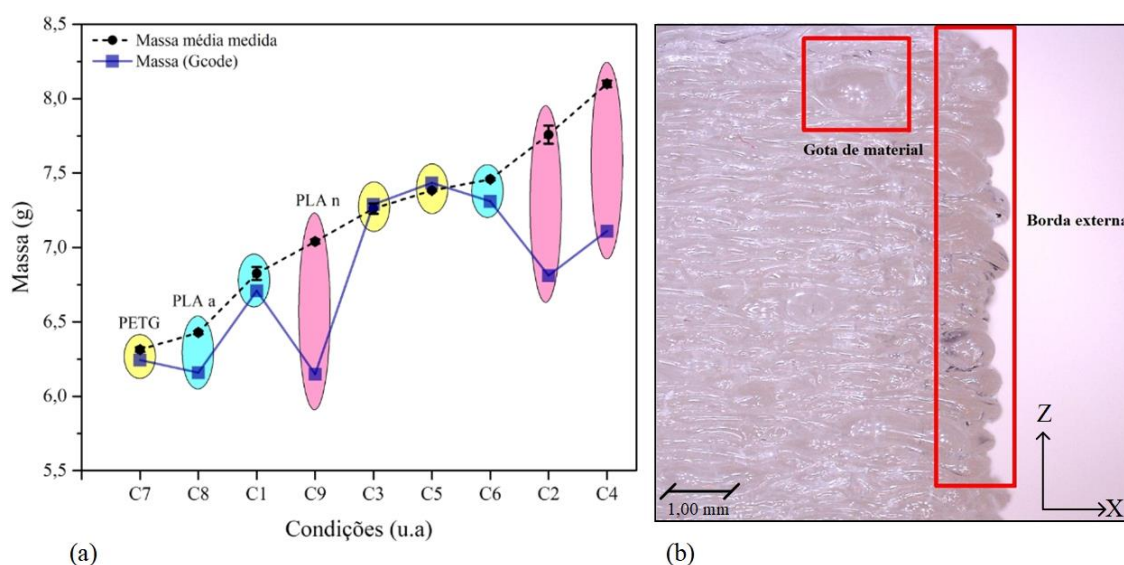


Figura 80 – Massa medida versus massa calculada a partir do Gcode (a), e excesso de material (PLA n) (b).

Para finalizar, quanto às estratégias de deposição, os piores resultados foram obtidos ao se utilizar uma estratégia do tipo *raster* 45°/-45°. Uma das causas para as maiores variações nas dimensões das peças impressas com tal estratégia pode estar correlacionada à complexidade das trajetórias em *zig-zag* e inclinadas, associada ao espaço e à liberdade para acomodação dos filamentos depositados (reduzido, já que as peças dispunham de bordas com dimensões de 5mm e foram fabricadas com 100% de preenchimento), e ao maior volume de material aplicado nas zonas de transição entre duas trajetórias consecutivas — conforme apresentado no estudo anterior (seção 3.2).

Os efeitos da estratégia 45°/-45° são ainda agravados quando combinados com níveis críticos de outros parâmetros, Tabelas 21 e 22. Na condição 4, por exemplo, na qual a estratégia estava relacionada ao “PLA n”, foram observadas reduções consideráveis nas dimensões internas e aumento no eixo Z. Na condição 6, devido à redução de espaço de acomodação nas bordas pelo maior número de perímetros, foi gerado acúmulo de material na região central das estruturas, ampliando o valor da dimensão Z.

Estilos de preenchimento que alternam camadas com deposição de longos vetores (*raster* 0°/90°), ou que constroem as peças pela reprodução sucessiva do perfil principal do objeto (concêntrica), tendem a melhorar o desempenho dimensional, pois ajudam no processo de acomodação dos filamentos, através de movimentos suaves. Os resultados são refinados quando tais estratégias são combinadas com materiais com melhores características para o processo de impressão, neste caso o PETG e o PLA azul, conforme mostrado nas condições 3 e 8 da Tabela 22.

### 3.3.3 Conclusões sobre a análise dimensional em geometrias vazadas

A maior contribuição estatística dos materiais para a variação dimensional é a de alertar os usuários sobre a importância do reconhecimento das características globais dos mesmos para a configuração dos parâmetros de impressão. Como mostrado no presente estudo, mesmo materiais teoricamente iguais, diferentes apenas em função da cor e dos fornecedores, como no caso dos PLAs, podem ser significativamente diferentes para respostas dimensionais. Isso porque uma série de fatores, como variações do diâmetro do filamento e características de fluidez, que podem estar relacionados à confecção e à formulação química (síntese e aditivação) dos filamentos poliméricos e, portanto, aos distintos produtores, atuam diretamente no comportamento da impressão 3D.

Mesmo não variando experimentalmente a temperatura de extrusão, mas considerando-se a análise do índice de fluidez de diferentes materiais, este estudo corrobora o trabalho de Valerga *et al.* (2018), pois assim como no caso investigado pelos autores, condições de maior fluidez geraram maiores desvios dimensionais, o que foi observado na atual pesquisa, tanto em direções externas como em internas. Entretanto, diferentemente dos resultados obtidos pelos autores, nesta investigação, considerando apenas os PLAs, a versão natural obteve piores resultados dimensionais da que a pigmentada. Contudo, o efeito da cor pode ter sido suprimido pelas características reológicas dos materiais. A questão da cor, inclusive, não fez diferença quando se tratam de materiais distintos, mas com índices de fluidez próximos, como nos casos do PLA azul e do PETG (transparente), que na maior parte das dimensões apresentaram igualdade estatística.

Este trabalho concorda com as descobertas do primeiro estudo da análise dimensional das peças impressas (seção 3.2), uma vez que o excesso de material, mais uma vez, foi responsável pelas maiores variações dimensionais das peças impressas. Além de colaborar com os achados anteriores, este estudo os complementa, pois mostra que a origem dos maiores volumes de material depositado pode não estar somente relacionada aos cálculos realizados pelo *software* de fatiamento, mas também pelo ajuste inadequado, por parte do usuário, do diâmetro do filamento, e pelas propriedades viscosas dos materiais.

Por mais que no estudo anterior tenha sido observado que a temperatura de extrusão não influenciava na qualidade dimensional, o cenário centrava-se em um único material. Neste sentido, ao se variar os polímeros (mesmo se tratando de materiais em síntese iguais, mas diferentes em função de cor e fornecedor), os utilizadores devem estar atentos ao ajuste da temperatura de processamento para controlar o comportamento viscoso do material. Provavelmente, as peças em “PLA n” podem ser melhoradas reduzindo a temperatura de extrusão, em conjunto com o ajuste adequado de variáveis como multiplicador de extrusão e diâmetro do filamento.

Por fim, estratégias que combinam o uso de ângulos de deposição retos e rasos melhoram o aspecto dimensional, pois auxiliam no processo de acomodação dos filamentos depositados. Uma configuração base de parâmetros pode ser estabelecida, visto que os ajustes do primeiro estudo e as configurações encontradas nesta etapa resultaram de forma semelhante no “PLA a” e no PETG. No entanto, peculiaridades dos materiais devem ser consideradas no processo de calibração. O PETG, por sua vez, considerando os melhores resultados em Z, demonstrou-se um material com boas características de impressão, que o tornam uma opção para aplicações que envolvam controle dimensional fino, como elementos para montagem.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Com base nos resultados obtidos no estudo das geometrias vazadas, foram selecionados para esta etapa os polímeros “PLA a”, o qual a partir deste tópico será chamado apenas de PLA, e o PETG. Os materiais foram escolhidos por apresentarem melhores resultados e igualdade estatística quanto à qualidade dimensional, além de um comportamento de fluidez semelhante. O objetivo geral desta fase foi obter informações sobre os termoplásticos, bem como das estratégias de impressão que poderiam ser pertinentes ao desenvolvimento e análise dos sistemas *snap-fit*. Os ensaios buscaram também aprofundar o reconhecimento sobre as propriedades do PETG, pois se trata de um material de recente adesão no cenário da Impressão 3D. As informações geradas nesta seção foram publicadas em artigo para a Revista Matéria (Rio de Janeiro), com o título: “Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica” (SANTANA *et al.*, 2018).

#### 3.4.1 Materiais e métodos

Os materiais foram caracterizados em três condições: em sua forma inicial (filamentar), e após ser processado por tecnologias de moldagem por injeção e de Manufatura Aditiva por extrusão — representadas respectivamente na Figura 81 (a), (b) e (c). Experimentalmente o trabalho foi dividido em dois grupos de análise, conforme mostrado na Figura 82.

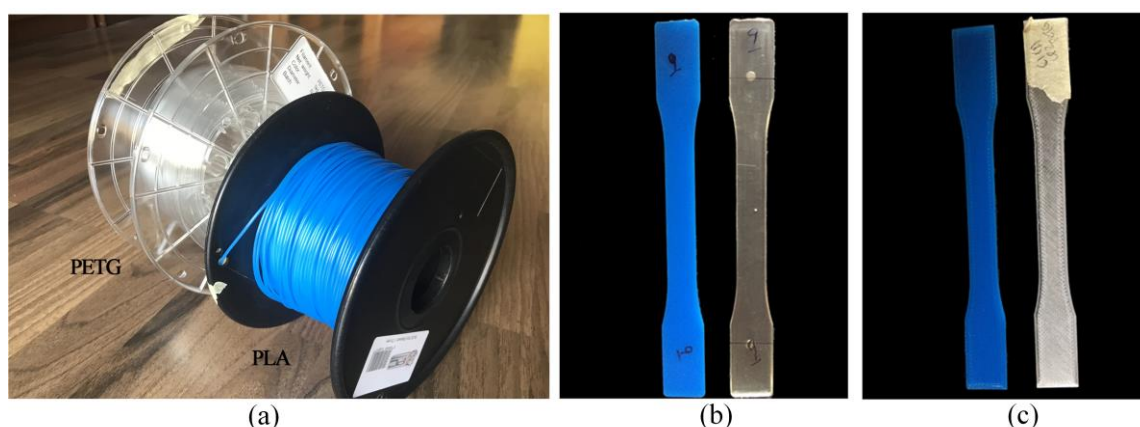


Figura 81 – Estado filamentar (a), peças injetadas (b), e amostras impressas (c) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2018).

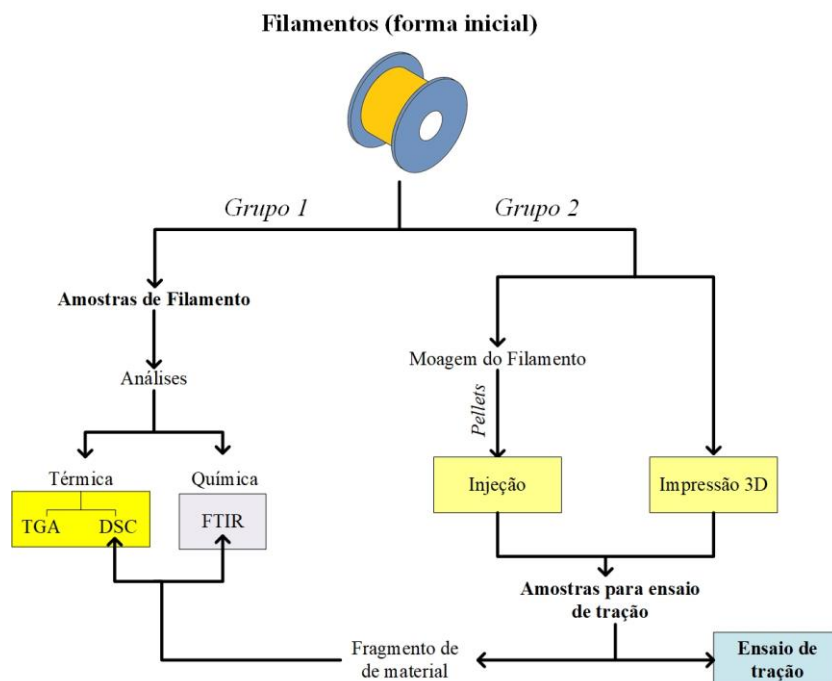


Figura 82 – Metodologia de análise (SANTANA *et al.*, 2018).

#### 3.4.1.1 Grupo 1: análises térmicas e químicas

Primeiramente foram analisados os aspectos térmicos e a composição química dos filamentos. O comportamento térmico dos termoplásticos foi estudado aplicando-se técnicas de análise termogravimétrica (TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC). A primeira foi utilizada para obter as temperaturas de degradação de ambos os polímeros, PLA e PETG. Com a análise de DSC buscou-se identificar as temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ), fusão ( $T_m$ ) e cristalização ( $T_c$ ), além de se obter o grau de cristalinidade do material <sup>32</sup>( $X_c$ ) — Eq. (4) (SCAPINI, 2008). As três últimas características são para o caso de um polímero semicristalino.

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0 \cdot \phi_m} \cdot 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

Utilizou-se a técnica da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para verificar as principais moléculas que compõem a estrutura dos filamentos e comparar os resultados com materiais semelhantes analisados na literatura. As condições para

<sup>32</sup>  $\Delta H_f$  corresponde à entalpia de fusão da amostra em J/g, obtida experimentalmente e apresentada na Tabela 25;  $\phi_m$  foi considerado 1 por se tratar de um polímero puro;  $\Delta H_f^0$  é a entalpia de fusão do PLA hipoteticamente 100% cristalino, neste caso igual a 93 J/g (FISCHER *et al.*, 1973; ZHAI *et al.*, 2009).

todos os ensaios, igualmente utilizadas para os dois materiais, bem como os equipamentos de análise, são apresentados na Tabela 23.

Em um segundo momento, as análises térmicas, especialmente<sup>33</sup> o DSC, e a química foram realizadas em amostras de ambos os materiais, coletadas dos corpos de prova de tração fabricados por injeção (a partir dos filamentos peletizados) e Impressão 3D. Foi analisada uma amostra de material para cada condição, injetada e impressa, em cada uma das técnicas de caracterização citadas. Especificamente nas peças impressas, o fragmento de material para os estudos mencionados foi retirado das peças (PLA e PETG) que apresentaram os melhores resultados para tensão máxima e módulo de *Young*. O objetivo dos experimentos foi verificar se ocorreram diferenças significativas na estrutura molecular e nas características térmicas dos polímeros em função das variáveis (fatores de influência) dos processos de fabricação aplicados. As condições para os ensaios foram as mesmas utilizadas nas análises dos filamentos (Tabela 23).

Tabela 23 – Condições e equipamentos dos ensaios térmicos e químico (adaptado de SANTANA *et al.*, 2018).

Ensaio	Condições	Equipamentos
TGA	Taxa de aquecimento de 20°C/min, intervalo entre 25°C e 800°C, atmosfera de ar sintético.	STD Q600 <i>TA Instruments</i>
DSC	Rampa de aquecimento de 0°C a 250°C, taxa de 10°C/min, atmosfera de nitrogênio.	Q20 <i>TA Instruments</i>
FTIR	Espectros entre (4000 e 600) cm <sup>-1</sup>	Cary 630 FTIR, <i>Agilent Technologies</i>

#### 3.4.1.2 Grupo 2: análises mecânicas

Foram fabricadas amostras impressas em PLA e PETG, com diferentes ângulos de varredura ( $\hat{A}_v$ ), estratégias de deposição ( $E_d$ ) e orientações de construção ( $O_c$ ) — Figura 83 (a) e (b). A combinação dos parâmetros citados e dos níveis atribuídos a estes geraram três configurações, conforme mostrado na Tabela 24, que contém também o ajuste das variáveis fixas.

É importante mencionar que os parâmetros  $E_d$  e  $O_c$  foram utilizados como variáveis auxiliares para o estudo da influência do ângulo de varredura. O *software* de fatiamento Slic3r, na versão utilizada, por padrão, inverte as camadas em 90° durante a impressão dos modelos.

<sup>33</sup> É importante destacar que as mesmas respostas avaliadas na análise de DSC com os filamentos em sua condição inicial foram investigadas nos fragmentos de peça impressa e injetada.

Quando o usuário ajusta o ângulo de deposição dos filamentos (*Fill angle*) em  $0^\circ$ , por exemplo, o modelo será confeccionado com camadas com preenchimento em  $0^\circ$  alternadas com camadas com filamentos em  $90^\circ$ . Portanto, para serem obtidas camadas com a configuração unidirecional, com todos os filamentos alinhados dentro e entre camadas, e na direção de aplicação das cargas de tração, desenvolveu-se uma solução que combinou o uso de uma estratégia concêntrica (que consiste no preenchimento das camadas baseado na reprodução sucessiva do perímetro principal da geometria) com uma orientação lateral — Figura 83 (b).

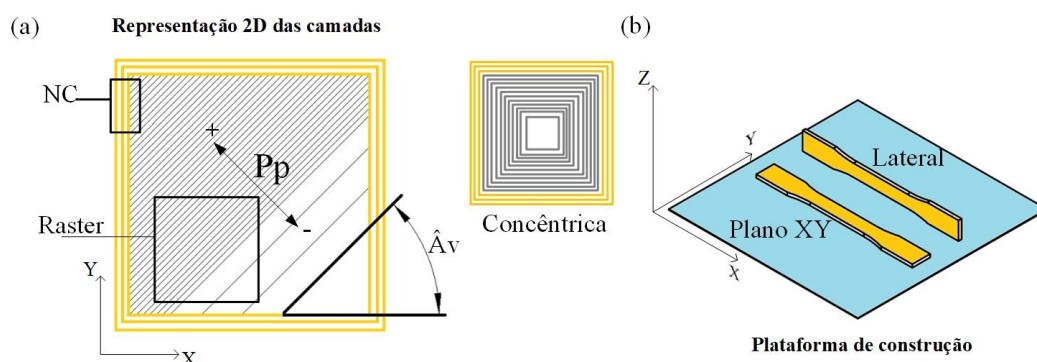


Figura 83 – Representação dos parâmetros de processo avaliados: (a)  $\hat{A}_v$  e  $E_d$ , e (b)  $O_c$  (adaptado de SANTANA *et al.*, 2018).

Tabela 24 – Condições experimentais e parâmetros fixos (adaptado de SANTANA *et al.*, 2018).

Condição	$\hat{A}_v$ (°)	$E_d$ (u.a)	$O_c$ (u.a)
C1	45/-45	Raster	No plano (XY)
C2	0/90	Raster	No plano (XY)
C3	Unidirecional (0°)	Concêntrica	Lateral
Principais parâmetros fixos			
$E_c$	0,2 mm		
$P_p$	100%		
$N_p$	3		
$T_e$	215°C (PLA) e 235°C (PETG)		
$T_b$	70°C		
Nota: espessura de camada ( $E_c$ ), percentual de preenchimento ( $P_p$ ), número de perímetros ( $N_p$ ), temperaturas de extrusão ( $T_e$ ) e da base (plataforma de construção) ( $T_b$ ). As velocidades foram mantidas com o melhor ajuste da etapa de calibração paramétrica e o multiplicador de extrusão em 0,9.			

Para cada uma das condições da Tabela 24 foram fabricadas 5 amostras, individualmente, com geometria baseada na norma ASTM D638 (2010), gerando um total de 15 corpos de prova por material. As peças foram impressas no mesmo equipamento das etapas anteriores. Os ensaios de tração foram realizados em um equipamento modelo 4507 (Instron), com célula de carga de 250kN e velocidade de ensaio de 5 mm/min. As amostras também foram avaliadas por aquisição de imagens e medição da massa (balança *Kern als*, máx 250g e 0,1 mg de resolução).



O comportamento mecânico do PLA e do PETG também foi estudado sem a influência de características naturais do processo de Impressão 3D por extrusão, isto é, peças com a presença de linhas de adesão e vazios. Para tal foram moídos os filamentos poliméricos (peletizados) e injetados corpos de prova (Figura 84), com as mesmas geometrias dos impressos, em uma máquina ARBURG 370E 600 (EUROMAP 170), com temperaturas de injeção de 215°C e 235°C, respectivamente para o PLA e o PETG. Os demais parâmetros de injeção foram ajustados igualmente para os dois materiais: tempo e temperatura de secagem dos *pellets* (24h a 50°C), diâmetro da rosca da injetora (30 mm), vazão de injeção (20 cm<sup>3</sup>/s), tempo de recalque (9 s), tempo de resfriamento (55 s), pressão de injeção (1200 bar), volume de decompressão (5 cm<sup>3</sup>), força de fechamento (450 kN) e temperatura do molde (30°C).

Os ensaios de tração dos componentes injetados, em um total de cinco por cada material, foram feitos em um equipamento modelo 250kN (MTS), com célula de carga de 10kN e velocidade de ensaio de 5 mm/min. Para a medição do coeficiente de Poisson foram testadas mais três amostras de PLA e PETG, cujas deformações longitudinais e transversais foram adquiridas por análise de correlação de imagem (equipamento com resolução das câmeras: 4,5 megapixels). Assim como nas amostras impressas, também foi medida a massa dos corpos de prova, utilizando a balança já citada anteriormente.

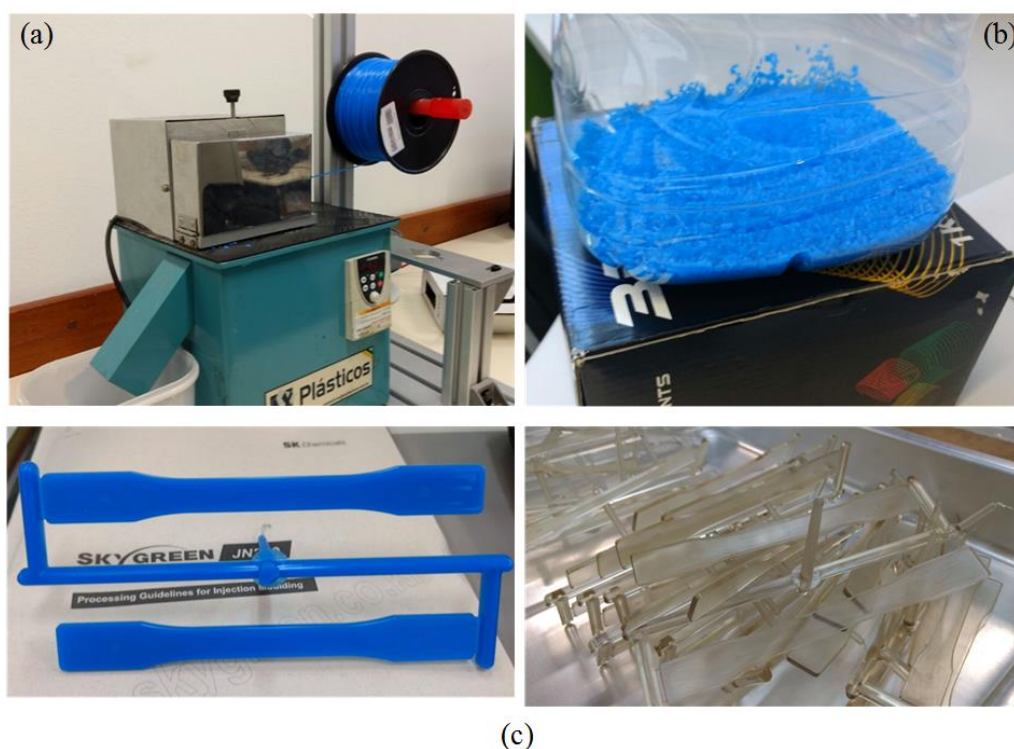


Figura 84 – Processo de moagem (a), filamentos moídos (b) e (c) peças injetadas em PLA azul e PETG (SANTANA *et al.*, 2018).



### 3.4.2 Resultados e discussões

#### 3.4.2.1 Grupo 1: análises térmicas e química

Inicialmente são apresentados os resultados da análise de TGA realizada nos filamentos de PLA e PETG (Figura 85). Com base nas curvas obtidas, as quais relacionam a variação do percentual de massa em função da temperatura, foram identificadas as temperaturas de decomposição dos materiais. Pode-se observar que ambos os polímeros apresentam dois estágios de perda de massa, sendo o primeiro mais pronunciado.

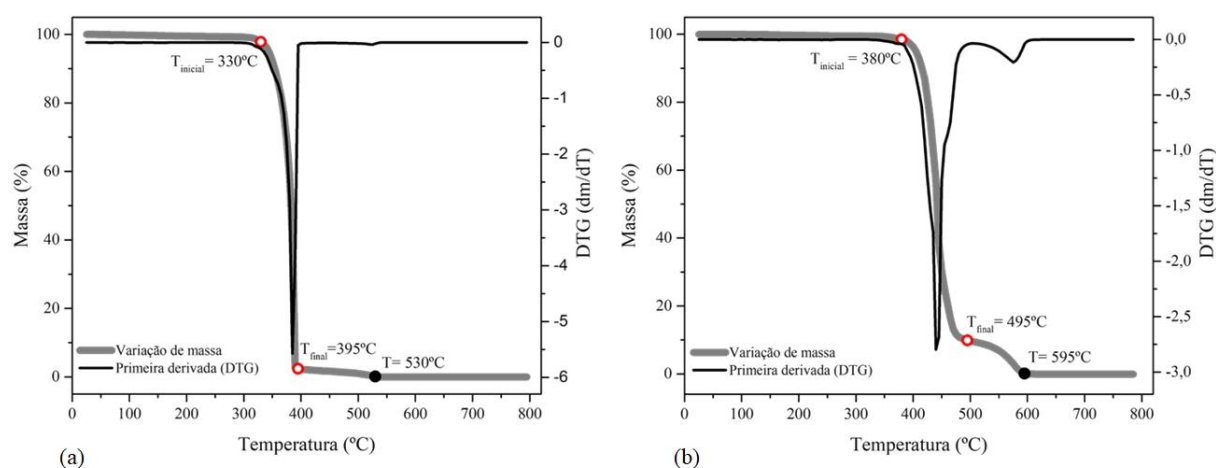


Figura 85 – Resultados da análise de TGA com os filamentos de PLA (a) e PETG (b) (SANTANA *et al.*, 2018).

O principal estágio de decomposição térmica do PLA avaliado neste estudo inicia-se a uma temperatura ( $T_{\text{inicial}}$ ) de aproximadamente 330°C e finaliza ( $T_{\text{final}}$ ) em 395°C, com uma variação da quantidade inicial de material de 98%. Um segundo estágio de degradação ocorre entre 395°C e 530°C, com uma perda de massa de 2%, sendo verificada a degradação total do material após esta última temperatura. No caso do PETG, a degradação principal inicia-se em 380°C, isto é, 50°C a mais do que o PLA. O final deste estágio de decomposição do PETG ocorre em 495°C, 100°C acima do PLA, com variação de 90% da massa inserida no ensaio. O segundo pico observado para o material, com uma variação de massa de 10%, transcorreu no intervalo entre 495°C e 595°C. Para temperaturas superiores a 595°C identifica-se a decomposição total do polímero, uma vez que a massa residual é zero.

Comparando os resultados obtidos com estudos da literatura, não limitados à Impressão 3D, constatou-se que para o PLA a temperatura inicial de decomposição ( $T_{\text{inicial}} = 330^\circ\text{C}$ ) ficou próxima aos valores encontrados por Shih e Huang (2011) e Carrasco *et al.* (2010b),

respectivamente 342,2°C e 337,5°C. No estudo de Carrasco *et al.* (2010b), estes identificaram uma redução de 95% da massa inicial de PLA em 377°C, resultados similares aos reportados neste trabalho.

Chen *et al.* (2015a) avaliaram pela técnica de TGA a temperatura de decomposição do PETG com diferentes composições químicas e obtiveram valores de temperatura inicial de degradação entre (401,2 e 405,7) °C, intervalo este que se aproxima ao valor observado no presente estudo. Ainda para efeitos de comparação, Paszkiewicz *et al.* (2017) analisaram a degradação térmica do PETG em duas condições de atmosfera no ensaio de TGA, inerte e oxidante (ar sintético), e verificaram que as temperaturas para uma perda de 90% da massa inicial foram, respectivamente, 602,9°C e 519,8°C.

Neste estudo, para o mesmo valor de redução de massa e utilizando-se ar sintético, a temperatura final de degradação, já mencionada, foi de 495°C, indicando que essa atmosfera acelera o processo de decomposição térmica do PETG. Por fim, o segundo estágio de degradação do PETG, mais acentuado que o do PLA, também foi observado de forma semelhante no trabalho de Paszkiewicz *et al.* (2017). O efeito pode estar relacionado a um elemento da composição química do material que necessita de maior energia térmica para decompor totalmente a amostra inicial de filamento ou a resíduos da degradação.

Seguindo a apresentação dos resultados das análises térmicas, na Figura 86 (a) e (b) são representados os termogramas de DSC obtidos para o PLA e o PETG em diferentes condições, isto é, filamentar (inicial), impressa e injetada. Os resultados da análise são sumarizados também na Tabela 25. Ao começar a interpretação dos dados, a partir das informações obtidas com os materiais na sua forma inicial, foi possível identificar o PLA como um polímero semicristalino e o PETG como amorfo. As temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ), fusão ( $T_m$ ) e cristalização ( $T_c$ ) do filamento de PLA foram, respectivamente, 61,9°C, 170,0 °C, e 101,2 °C. Os valores de  $T_g$  e  $T_m$  encontrados são próximos aos relatados por Santana *et al.* (2016) —  $T_g$  de aproximadamente 65 °C para filamentos de PLA pigmentados e 62°C para um filamento dito “natural”; e  $T_m$  entre (174 e 175) °C para os coloridos e 158°C para o “natural” — e Song *et al.* (2017)  $T_g$  igual a 61°C e  $T_m$  a 168°C — os quais também caracterizaram o material no contexto da Impressão 3D. Em comparação ao PLA, o filamento de PETG avaliado dispõe de uma maior temperatura de transição vítrea, cerca de 14,3°C superior (76,2 °C). Este valor é equiparável aos resultados obtidos no experimento de Lam *et al.* (2004) ( $T_g = 77^\circ\text{C}$ ), apesar de este não ser um estudo da área da Manufatura Aditiva.

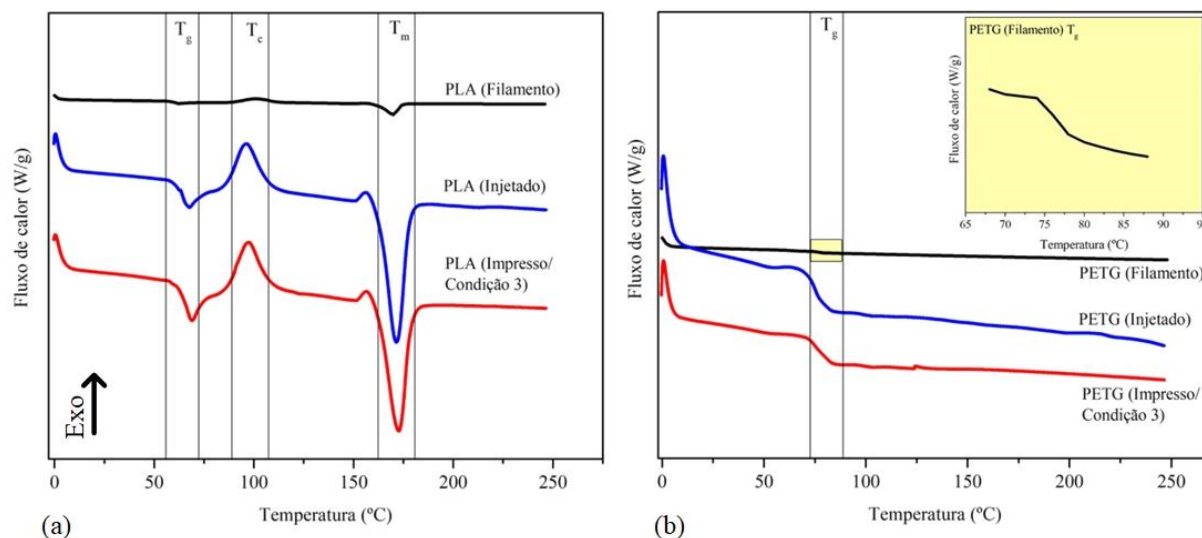


Figura 86 – Curvas da análise de DSC, PLA (a) e PETG (b) (adaptado de SANTANA *et al.*, 2018).

Tabela 25 – Resultados da análise de DSC com PLA e PETG em diferentes estados (adaptado de SANTANA *et al.*, 2018).

Material/Estado	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	$X_c$ (%)
PLA/Filamento	61,9	170,0	101,2	34,9	37,5
PLA/Injetado	64,3	171,4	96,3	40,0	43,0
PLA/ Impresso	66,9	172,6	97,4	38,9	41,8
PETG/Filamento	76,2	-	-	-	-
PETG/Injetado	75,3	-	-	-	-
PETG/ Impresso	75,0	-	-	-	-

O comportamento térmico do PLA após o processamento pelas técnicas de Impressão 3D e moldagem por injeção foi alterado no sentido de aumento das temperaturas de transição vítrea e de fusão, e redução da temperatura de cristalização em relação ao estado inicial. A diferença entre a  $T_g$  do filamento e da amostra obtida da peça injetada foi de aproximadamente  $+2,4^\circ\text{C}$  ( $\approx +4\%$ ). Já na comparação com a porção oriunda do componente impresso, a variação foi maior, aproximadamente  $+5^\circ\text{C}$  ( $\approx +8\%$ ). No caso da fusão, as diferenças foram menores, cerca de  $+1,4^\circ\text{C}$  ( $\approx +0,8\%$ ) para a injetada e  $+2,6^\circ\text{C}$  ( $\approx +1,5\%$ ) para a impressa. A redução da temperatura de cristalização do PLA injetado e impresso, em relação ao filamento, foi próxima a  $-4,9^\circ\text{C}$  ( $\approx -5\%$ ) e  $-3,8^\circ\text{C}$  ( $\approx -4\%$ ), respectivamente. O elemento impresso apresentou resultados ligeiramente maiores do que o injetado:  $+2,6^\circ\text{C}$  ( $\approx +4\%$ ),  $+1,2^\circ\text{C}$  ( $\approx +0,7\%$ ) e  $+1,1^\circ\text{C}$  ( $\approx +1\%$ ), nesta ordem para  $T_g$ ,  $T_m$  e  $T_c$ .

O grau de cristalinidade do PLA aumentou (Tabela 25) em relação a sua condição inicial, devido à ação dos processos de manufatura utilizados neste estudo. Do valor calculado para o polímero enquanto filamento (37,5%), para o material após a impressão e a injeção, verificou-

se um aumento na cristalinidade de aproximadamente +4,3% e +5,5%, para cada tecnologia respectivamente. Esse resultado pode ser atribuído à maior organização molecular decorrentes dos processos de manufatura (injeção e Impressão 3D).

Segundo Song *et al.* (2017), uma justificativa para o baixo grau de cristalinidade dos filamentos (condição inicial do material para o processo de Impressão 3D) se deve ao resfriamento rápido durante a fabricação deste produto, não permitindo assim um arrefecimento lento que colabore para o processo de cristalização. Entretanto, os efeitos introduzidos pelas variáveis da moldagem por injeção e da Impressão 3D (considerando a Condição 3, da qual se avaliou a cristalinidade), na comparação entre si, não foram muito significativos para as alterações no grau de cristalinidade do PLA, uma vez que se observa uma diferença mínima de aproximadamente 1,2%.

O PETG, por sua vez, demonstrou-se um material mais estável. A variação na temperatura de transição vítrea do material, no sentido de redução, foi de apenas  $-0,9^{\circ}\text{C}$  ( $\approx -1,2\%$ ) da  $T_g$  do filamento para a da amostra da peça injetada e de  $-1,2^{\circ}\text{C}$  ( $\approx -1,6\%$ ) para o fragmento do modelo impresso.

Seguindo com a apresentação dos resultados, na Figura 87 (a) e (b) são disponibilizadas as curvas do ensaio de FTIR com os materiais nos diferentes estados. A Tabela 26 mostra os principais picos, associados aos números de ondas, identificados no ensaio de espectroscopia e representados nas regiões delimitadas pelos retângulos (1 a 5) da Figura 87 (a) e (b).

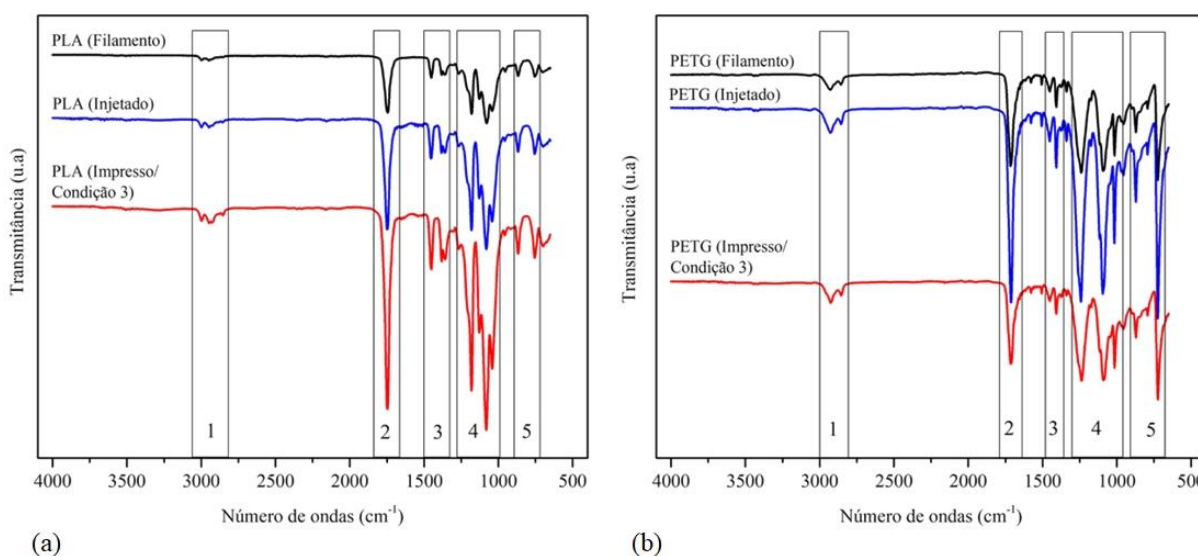


Figura 87 – Curvas da análise de FTIR, (a) PLA e (b) PETG (SANTANA *et al.*, 2018).

Tabela 26 – Resultados da análise de FTIR por regiões delimitadas nas curvas (adaptado de SANTANA *et al.*, 2018).

Material/Estado	Número de ondas (cm <sup>-1</sup> )				
	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5
PLA/Filamento	2996; 2945	1745	1451; 1381; 1357	1180; 1128; 1079; 1041	867; 755
PLA/Injetado	2997; 2947; 2856	1748	1453; 1383; 1359	1181; 1128; 1081; 1041	868; 755
PLA/Impresso	2997; 2944; 2855	1747	1451; 1382; 1358	1181; 1128; 1081; 1042	867; 755
PETG/Filamento	2927; 2856	1715	1451; 1408	1239; 1092; 1016	873; 725
PETG/Injetado	2926; 2856	1712	1451; 1408	1242; 1094; 1017	873; 724
PETG/ Impresso	2925; 2855	1713	1451; 1408	1237; 1090; 1016	872; 724

Em uma análise geral dos espectros observados para o PLA, verificou-se que os valores se encontram próximos aos resultados obtidos nos estudos de Santana *et al.* (2016) e Cuiffo *et al.* (2017), os quais também avaliaram o material no contexto da Impressão 3D. Para auxiliar na interpretação dos números de ondas, tal como nas análises térmicas, outras referências sobre o PLA, e que não se limitam ao cenário da Manufatura Aditiva, foram utilizadas. Os picos contidos em cada uma das Regiões das curvas do FTIR do PLA são interpretados como:

- os espectros da Região 1 correspondem ao estiramento -CH (grupo CH<sub>3</sub>) (CHIENG *et al.*, 2014; SANTANA *et al.*, 2016; CUIFFO *et al.*, 2017; CHOKSI e DESAI, 2017; KUMAR *et al.*, 2017);
- as bandas da Região 2 foram associadas ao estiramento carbonilo C=O do grupo -CO-O- do PLA (CHIENG *et al.*, 2014; SANTANA *et al.*, 2016; MAI *et al.*, 2012; HAMI *et al.*, 2014; YUNIARTO *et al.*, 2016; SHARIFAH *et al.*, 2017);
- o intervalo observado na Região 3 está relacionado, de acordo com o padrão apresentado por Choksi e Desai (2017) (1375 cm<sup>-1</sup> a 1475 cm<sup>-1</sup>), às vibrações de flexão CH<sub>3</sub>;
- na Região 4 são encontrados espectros classificados como o estiramento C-O-C (KACZMAREK e VUKOVIĆ-KWIATKOWSKA, 2012; CAI *et al.*, 2013; HILAL *et al.*, 2015; NANTHANANON *et al.*, 2015; BITENCOURT *et al.*, 2017).
- a Região 5, por fim, apresenta uma banda em 867 cm<sup>-1</sup>, que segundo Cuiffo *et al.* (2017) e Kister *et al.* (1998) equivale à vibração C-COO, e outra em 775 cm<sup>-1</sup>, contida no intervalo entre (733 e 756) cm<sup>-1</sup> descrito por Xu *et al.* (2017) como vibrações esqueléticas dos grupos metileno.

No caso do PETG, a maior parte dos estudos envolvendo a análise de FTIR foram para o material em aplicações gerais. Com base na literatura, os espectros do material, para cada região, foram interpretados como:

- f) as bandas da Região 1, (2925 a 2927)  $\text{cm}^{-1}$  e (2855 a 2856)  $\text{cm}^{-1}$ , dizem respeito ao estiramento C-H, simétrico e assimétrico, devido à presença de metileno no copolímero PETG (JAYAKUMAR *et al.*, 2002; CHEN *et al.*, 2015a);
- g) o pico identificado na Região 2, para o material nas diferentes condições, equivale ao estiramento C=O do grupo éster (CHEN *et al.*, 2015a; CHEN *et al.*, 2015b, STRAIN *et al.*, 2015; CHEN e ZHANG, 2016; PASZKIEWICZ *et al.*, 2017);
- h) a Região 3 apresenta espectros em 1451  $\text{cm}^{-1}$  e 1408  $\text{cm}^{-1}$ , que correspondem, respectivamente, a um pico de flexão  $\text{CH}_2$  e a um pico C-H (LEE *et al.*, 2000; NAKAMURA *et al.*, 2002; CHEN *et al.*, 2015a; CHEN *et al.*, 2015b);
- i) para a Região 4 os números de onda de 1237  $\text{cm}^{-1}$  a 1242  $\text{cm}^{-1}$  são classificados como um estiramento C(O)-O (GUO *et al.*, 2009; PASZKIEWICZ *et al.*, 2017). Os valores em (1090 a 1094)  $\text{cm}^{-1}$  são atribuídos ao estiramento simétrico C-O (glicol) (WARD e WILDING, 1977; COLE *et al.*, 2002; CHEN *et al.*, 2015b), e as bandas em 1016  $\text{cm}^{-1}$  e 1017  $\text{cm}^{-1}$  representam a flexão C-H no plano do anel aromático (COLE *et al.*, 1994; CHEN *et al.*, 2015b ; SAFAK e KARACA, 2016);
- j) os espectros em (872 a 873)  $\text{cm}^{-1}$  e (724 a 725)  $\text{cm}^{-1}$ , Região 5, referem-se, nesta ordem, à flexão C-H fora do plano do anel benzeno, e à flexão C-H fora do plano do anel mais a flexão C=O (COLE *et al.*, 1994; CHEN *et al.*, 2015b; CHEN e ZHANG, 2016).

Para ambos os materiais, os espectros obtidos para as amostras impressas e injetadas são similares aos do filamento, não sendo observadas variações significativas após o processamento. O fato sugere que as condições de fabricação (equipamentos, parâmetros, ambiente, etc.) utilizadas neste estudo não alteraram os grupos funcionais presentes e não promoveram deslocamentos que possibilitem avaliar modificações químicas e a presença de agentes contaminantes nos polímeros.

#### 3.4.2.2 Grupo 2: análise mecânicas

Os resultados obtidos nos ensaios de tração, bem como a massa das amostras de PLA e PETG injetadas, são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Resultados dos ensaios de tração com as amostras injetadas em PLA e PETG (adaptado de SANTANA *et al.*, 2018).

Propriedades	PLA	PETG
$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$53,32 \pm 0,33$	$49,78 \pm 0,37$
$\varepsilon_{\sigma\text{máx}}$ (mm/mm)	$0,02 \pm 2,6\text{E-}4$	$0,05 \pm 2,0\text{E-}4$
$E$ (GPa)	$2,69 \pm 0,03$	$1,50 \pm 0,02$
$\nu$ (u.a)	$0,30 \pm 0,08$	$0,43 \pm 0,001$
Massa (g)	$10,40 \pm 0,03$	$10,78 \pm 0,02$
Nota: tensão máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ), deformação na tensão máxima ( $\varepsilon_{\sigma\text{máx}}$ ), módulo de <i>Young</i> ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).		

Em uma análise geral das informações encontradas com os ensaios de tração das amostras injetadas (Tabela 27), constatou-se que o PLA apresenta, na maior parte dos casos, propriedades mecânicas superiores ao PETG. A tensão máxima, por exemplo, é aproximadamente 7% maior que a do PETG. Entretanto, este último dispõe de uma maior capacidade de deformação até atingir o ponto máximo, praticamente o dobro, quando confrontado com o PLA.

Uma das maiores diferenças identificadas na comparação entre os dois materiais foi em relação à rigidez dos polímeros. Considerando os valores do módulo de *Young* (elasticidade), o PLA apresentou-se cerca de 1,8 vez, ou 79%, mais rígido que o PETG <sup>34</sup>. Além do módulo de elasticidade, o coeficiente de *Poisson*, dentro de determinados intervalos, também permite classificar os materiais quanto a sua rigidez ou flexibilidade. Informações da literatura descrevem: “o coeficiente de *Poisson* para a maioria dos polímeros frágeis é de aproximadamente 0,3; para polímeros flexíveis encontra-se em aproximadamente 0,45” (CARVALHO, 2007, p.39); “Valores comuns para a faixa de materiais de borracha estão entre 0,49 e 0,4999; para plásticos entre 0,20 e 0,40” (HERNANDEZ, 2009, p.995); “Polímeros flexíveis, polímeros rígidos, e cargas sólidas têm valores próximos a 0,4, 0,3 e 0,3, respectivamente” (KATZ e MILEWSKI, 1987, p.35). Com base nos valores de referência, confirma-se através da análise do coeficiente de Poisson a rigidez do PLA (0,3) e a flexibilidade do PETG (0,43). A flexibilidade do PETG em comparação ao PLA pode estar relacionada também ao fato daquele polímero apresentar uma estrutura do tipo amorfa, conforme conceitos descritos por Banik (2006) e Carraher Jr. (2017).

Relativamente à massa das amostras, para um mesmo volume das peças injetadas (8,4 cm<sup>3</sup>), observa-se uma pequena diferença na qual o PETG apresenta cerca de 0,38g ( $\approx +4\%$ ) a mais que o PLA, variação esta que pode estar relacionada ao fato de que o PETG é mais denso

<sup>34</sup> De acordo com Canevarolo (2006) o módulo de Young está diretamente relacionado com a rigidez do polímero, isto é, quanto maior for o valor do módulo maior será a rigidez do polímero.

que o PLA. A partir da relação entre a massa e o volume das amostras foi possível determinar a densidade aparente dos materiais: aproximadamente  $1,24 \text{ g/cm}^3$  para o PLA e  $1,28 \text{ g/cm}^3$  para o PETG. Os valores são muito semelhantes aos disponíveis na literatura para o PLA ( $1,25 \text{ g/cm}^3$ ) (HENTON *et al.*, 2005; SANTANA *et al.*, 2016) e o PETG ( $1,27 \text{ g/cm}^3$ ) (CHEN e ZHANG, 2016).

Apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais, oriundas de amostras totalmente sólidas (injetadas), a seguir (Tabela 28) são mostrados os resultados encontrados nos testes à tração e na medição da massa das peças em PLA e PETG, influenciados pelas características do processo de Impressão 3D por extrusão.

Tabela 28 – Resultados obtidos nos ensaios de tração, e medição da massa das amostras impressas (adaptado de SANTANA *et al.*, 2018).

Propriedades	PLA (C1)	PLA (C2)	PLA (C3)
$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$43,50 \pm 0,72$	$36,61 \pm 0,80$	$49,34 \pm 1,12$
$\varepsilon_{\sigma\text{máx}}$ (mm/mm)	$0,02 \pm 2,8\text{E-}4$	$0,01 \pm 4,2\text{E-}4$	$0,01 \pm 4,1\text{E-}4$
$E$ (GPa)	$3,30 \pm 0,12$	$3,17 \pm 0,06$	$3,59 \pm 0,03$
Massa (g)	$10,18 \pm 0,03$	$9,82 \pm 0,05$	$9,90 \pm 0,07$
Propriedades	PETG (C1)	PETG (C2)	PETG (C3)
$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$32,15 \pm 0,67$	$28,21 \pm 1,70$	$41,10 \pm 0,14$
$\varepsilon_{\sigma\text{máx}}$ (mm/mm)	$0,03 \pm 1,1\text{E-}3$	$0,02 \pm 1,4\text{E-}3$	$0,03 \pm 3,0\text{E-}4$
$E$ (GPa)	$1,55 \pm 0,05$	$1,63 \pm 0,02$	$1,92 \pm 0,01$
Massa (g)	$9,96 \pm 0,08$	$9,81 \pm 0,04$	$9,79 \pm 0,02$

Os resultados apresentados acima foram avaliados pelo método da análise de variância (ANOVA)<sup>35</sup>, com o qual foi possível verificar que todas as respostas mecânicas e a massa, em ambos os materiais, foram influenciadas pelo ângulo de varredura. As médias por fator e níveis (representados por C1, C2 e C3), dos aspectos analisados, para o PLA e o PETG, são apresentadas nas Figuras 88 e 89.

Relativamente à tensão máxima, em ambos os materiais os melhores resultados foram associados à configuração unidirecional (C3) ( $\hat{A}V=0^\circ$ ) — Figura 88 (a) —, comportamento também observado em estudos clássicos da tecnologia de Impressão 3D por extrusão, como o de Ahn *et al.* (2002). Tal efeito é relacionado ao fato de que todos os filamentos depositados, dentro e entre as camadas, encontravam-se na mesma direção e alinhados no sentido de aplicação da carga (axial) no ensaio de tração. Segundo Bellini e Güçeri (2003), a arquitetura interna de peças fabricadas por FDM são semelhantes a uma estrutura compósita de fibras

<sup>35</sup> A tabela ANOVA, bem como os testes de Tukey para as condições que apresentaram alguma igualdade entre os níveis, são disponibilizados no Apêndice A.



reforçadas, na qual os filamentos individuais são mais resistentes na direção axial, como as fibras de um compósito; por outro lado, as peças apresentam um comportamento mais fraco na região de adesão entre filamento-filamento ou entre as camadas.

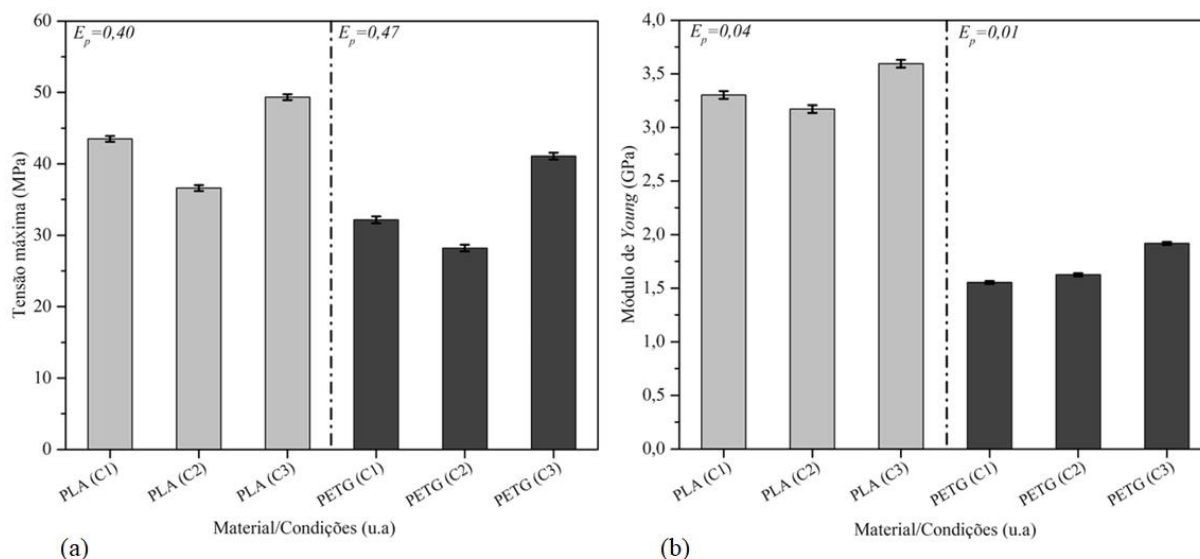


Figura 88 – Média da tensão máxima (a) e do módulo de Young (b) por condições e materiais (SANTANA *et al.*, 2018).

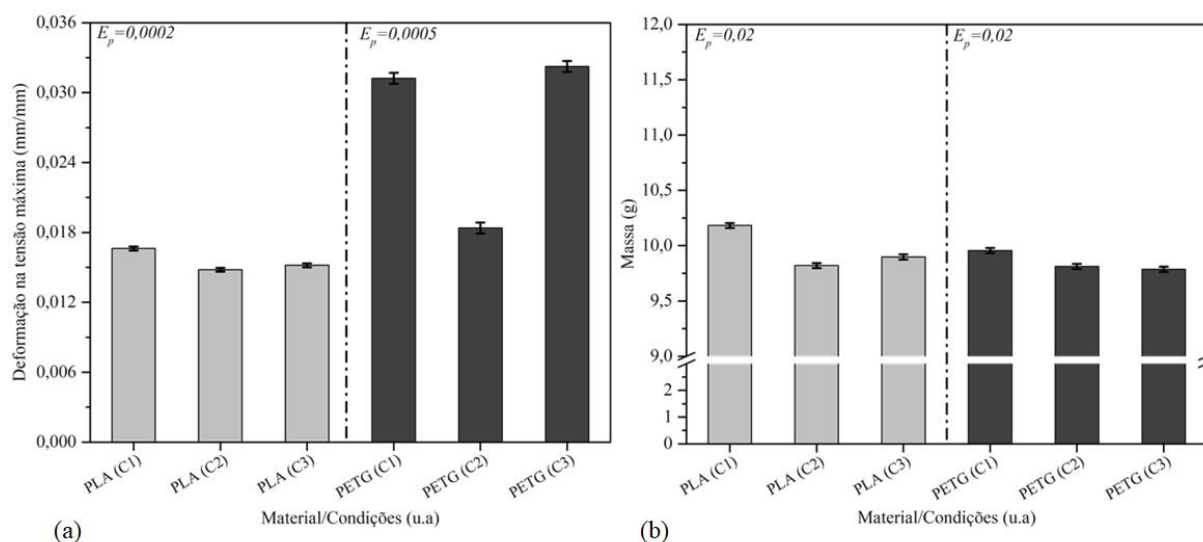


Figura 89 – Média da deformação na tensão máxima (a) e da massa (b) por condições e materiais (SANTANA *et al.*, 2018).

O conceito descrito pelos autores auxilia na compreensão dos efeitos observados neste trabalho. Como todos os filamentos da C3 estão dispostos, em conjunto, ao longo da direção axial, aumentou-se a capacidade de carga das peças impressas, além de se distribuir a maior parte da força ao longo dos filamentos, e não diretamente na linha de união entre eles. O

somatório desses efeitos faz com que a condição unidirecional ofereça maior resistência à tração aos componentes em PLA e PETG quando comparados às peças com os mesmos materiais, fabricadas com as condições C1 ( $45^\circ/-45^\circ$ ) — C3 aproximadamente 13% maior que C1 no PLA e cerca de 28% no PETG — e C2 ( $0^\circ/90^\circ$ ) — C3 aproximadamente 35% superior no PLA e aproximadamente 46% para o PETG.

A relação entre o alinhamento dos filamentos e a direção de aplicação dos esforços de tração com os melhores valores de tensão máxima pode também ser utilizada para justificar os maiores valores da Condição 1 frente a Condição 2. Especificamente sobre C2, apesar de ter camadas nas quais os filamentos encontram-se totalmente alinhados com a carga de tração, estas alternam-se com camadas em que as estruturas são depositadas em posições que promovem a aplicação de forças durante o teste na linha de adesão entre filamentos vizinhos, isto é, a região mais fraca descrita por Bellini e Güçeri (2003). Em outras palavras, as peças oriundas da Condição 2 ( $\hat{A}V = 0^\circ/90^\circ$ ) dispõem de apenas 50% da sua estrutura com capacidade de suportar melhor cargas à tração (camadas em  $0^\circ$ ). Em termos de comparação de tensão máxima, os resultados do PLA nas condições 1, 2, e 3 foram aproximadamente 35%, 30% e 20% maiores que os do PETG nas mesmas condições.

Quanto ao módulo de *Young*, o comportamento quanto aos maiores valores, tanto para o PLA como para o PETG, foi semelhante aos encontrados na tensão máxima, isto é, para a Condição 3 (unidirecional). No caso do PETG constata-se claramente um crescimento no módulo de elasticidade das peças construídas de C1 para C3 — Figura 88 (b). No PLA, por outro lado, verificou-se, pelo método de comparação de médias de Tukey, que a média do módulo — Figura 88 (b) — das amostras fabricadas em C1 eram estatisticamente iguais às confeccionadas em C2. Tal igualdade pode estar relacionada ao fator comum entre as condições, isto é, a orientação de construção.

Como as peças em C1 e C2 são impressas na mesma posição na plataforma de construção, os componentes produzidos nestas condições estão sujeitos a ações semelhantes do calor conduzido pela base, o que pode ter gerado fenômenos de cristalização equiparáveis no PLA, nas duas situações. Os resultados demonstram também que a presença de 50% das camadas com filamentos unidirecionais às cargas de tração em C2, para o PLA, garantem às amostras resistência a deformações, na zona elástica, semelhantes a um conjunto de malhas alternadas em  $45^\circ$ . Comparativamente, entre as mesmas condições de fabricação, o PLA apresentou-se como um material aproximadamente 2 vezes mais rígido que o PETG, razão próxima à observada nas amostras injetadas. No outro sentido, o aspecto é interessante pois demonstra a

capacidade do PETG em manter suas propriedades de flexibilidade, mesmo com as características induzidas pelo processo de Impressão 3D por extrusão.

Outra característica analisada nos ensaios de tração foi a deformação no ponto máximo da tensão — Tabela 28 e Figura 89 (a). Para o PLA, a condição com maior deformação até a tensão máxima foi a C1, com 1,7%. Já as condições C2 e C3 apresentaram valores médios ( $\approx 1,5\%$ ) estatisticamente iguais, segundo os resultados da análise de Tukey. A maior oposição às deformações por parte dos filamentos unidirecionais em PLA podem ter colaborado para a igualdade entre os módulos de *Young* de C2 e C1. Já no PETG, a maior deformação no pico máximo da tensão foi para as condições C1 e C3 ( $\approx 3\%$ ), ou seja, os dois conjuntos de dados apresentaram médias iguais. Os resultados mostram que a baixa capacidade de alongamento até a ruptura do PLA, descrita por Bai *et al.* (2012) e Wang *et al.* (2017), é transferida para os filamentos individuais impressos com o material. O PETG por sua vez, devido à menor resistência à tração, precisa de um maior número de estruturas alinhadas às cargas, para garantir ao material maior capacidade de deformação.

Em um aspecto geral, o PETG caracterizou-se como um material com maior capacidade de deformação até a tensão máxima, ou na zona elástica, quando comparado ao PLA. Esta característica pode estar relacionada a sua estrutura amorfa. As macromoléculas na região amorfa dos polímeros se entrelaçam vagamente e são fáceis de se espalhar e esticar, o que garante uma boa extensibilidade (MARK, 2007; YANG *et al.*, 2017). Apesar do estudo de Yang *et al.* (2017) ter utilizado um material semicristalino, o PEEK, uma correlação entre os efeitos observados pelos autores e os resultados quanto à deformação e à estrutura amorfa do PETG pode ser estabelecida. Yang *et al.* (2017) verificaram que na medida em que se reduzia o grau de cristalinidade, o alongamento até a ruptura aumentava, chegando a valores de deformação de até 130%, atingindo maior plasticidade. Por outro lado, segundo os autores, se o grau de cristalinidade aumentava 20%, o alongamento também reduzia 20%.

Como última resposta avaliada, tem-se a medição da massa das amostras — Tabela 28 e Figura 89 (b). Para ambos os materiais a condição 1 ( $45^\circ/-45^\circ$ ) foi a que apresentou maior massa, tendo as configurações 2 e 3, de acordo com o teste *post hoc* de Tukey, gerado grupos de amostras com massas médias iguais.

Diferentemente do estudo de Tanikella *et al.* (2017) que concluiu que a resistência à tração de peças fabricadas por Impressão 3D, em diversos materiais, incluindo o *T-Glase*®

(nome comercial do PETG)<sup>36</sup> depende em grande parte da massa das amostras, — com tendência de crescimento da resistência em função de maiores massas na maior parte dos filamentos —, neste estudo a relação não foi verificada — Figura 90 (a) e (b). Uma justificativa para este fato é que nesta investigação foram estudadas diferentes condições de fabricação das amostras (ângulos de varredura), que foram muito significativas para as variações nas respostas mecânicas, enquanto que no estudo de Tanikella *et al.*(2017) foi usada apenas uma estratégia de construção (segundo os autores, diagonal à direção de aplicação da carga de tração), variando os materiais — ABS, Nylon, Policarbonato, HIPS (5 cores diferentes), e T-Glase® (5 cores diferentes).

Em outras palavras, com base no contexto avaliado neste estudo, um aumento na quantidade de material depositado não tem, na maior parte dos casos, um impacto relevante no melhoramento das propriedades mecânicas. O que determina um aumento na qualidade das peças é a disposição dos filamentos depositados no interior das camadas (preferencialmente quando alinhados na direção das cargas aplicadas), a qualidade da união entre estes filamentos e a uniformidade na formação dos vazios.

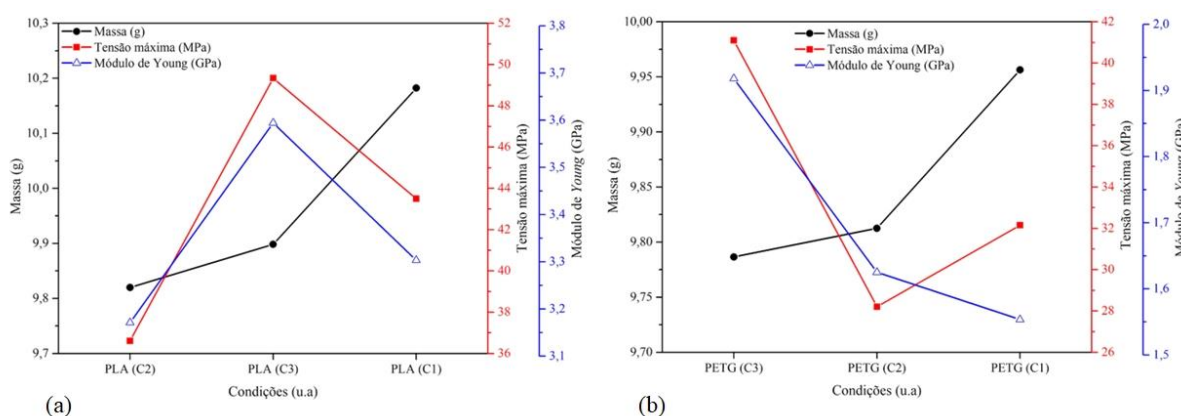


Figura 90 – Massa versus tensão máxima e módulo de *Young*, (a) PLA e (b) PETG (SANTANA *et al.*, 2018).

Para finalizar as discussões sobre a parte mecânica, foram realizadas comparações entre os resultados obtidos com as peças injetadas e impressas, Figura 91 (a) e (b). No PLA a diferença entre a tensão máxima das peças impressas diminuiu em relação às injetadas em cerca de 18%, 31%, e 7,5% nas Condições C1, C2 e C3, respectivamente. Já no PETG os percentuais de redução foram um pouco maiores, 35%, 43% e 17%, nesta ordem para C1, C2 e C3, o que

<sup>36</sup> Nome comercial utilizado pela empresa *Taulman 3D* para referir-se a sua formulação de PETG (AIRWOLF 3D, 2015).

pode ser entendido como maior resistência das peças injetadas do que as impressas para este material frente ao PLA.

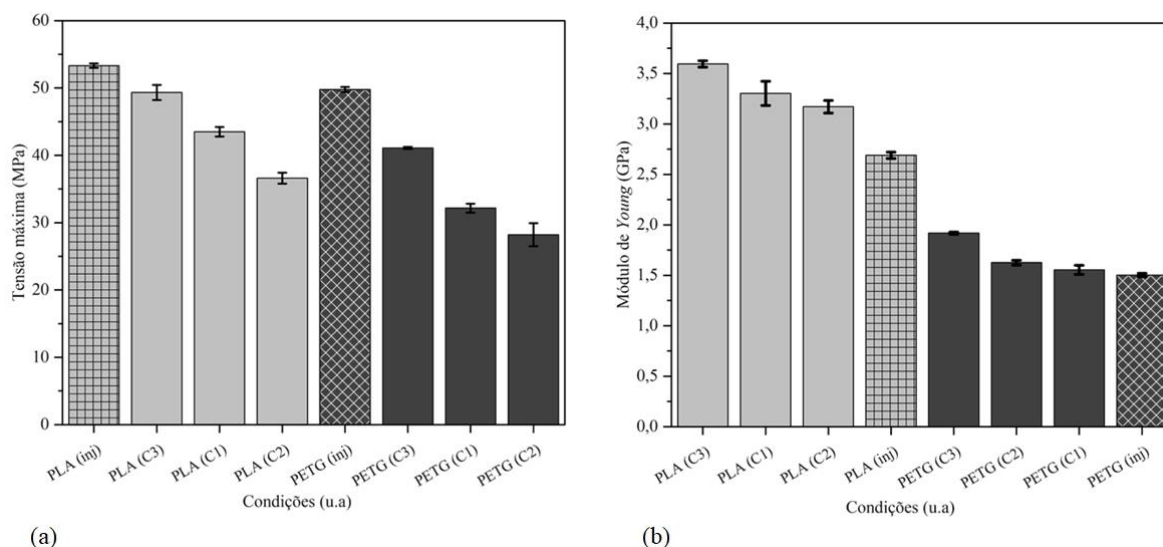


Figura 91 – Comparações entre as respostas para as peças injetadas e impressas, (a) tensão máxima e (b) módulo de *Young* (SANTANA *et al.*, 2018).

Em relação ao módulo de *Young*, verificou-se que as peças impressas apresentaram valores superiores aos componentes injetados. O módulo de elasticidade das amostras injetadas em PLA foi cerca de 19%, 15% e 25% menor que os dos elementos impressos em C1, C2 e C3, respectivamente. Para o PETG, a maior diferença entre o módulo das peças impressas em relação às injetadas foi identificado nos resultados da condição 3, aproximadamente 28% superior. Diferentemente do PLA, nas condições C1 e C2 o módulo de *Young* das amostras em PETG foi apenas 3% e 8% maior que o das peças injetadas. Apesar dos testes de tração para os elementos impressos e injetados terem sido realizados em máquinas de ensaio diferentes, o que poderia influenciar nas questões relacionadas ao módulo de elasticidade — aperto e deslizamento das amostras nas garras, aspectos de medição de deformação pelo extensômetro —, os efeitos observados neste estudo (maior módulo de *Young* para as amostras impressas) também foram descritos nos estudos de Song *et al.* (2017) e Page *et al.* (2017), os quais utilizaram o PLA, sustentando assim os resultados obtidos.

Os melhores resultados para a tensão máxima observados nas peças injetadas se devem ao fato de que as cargas aplicadas no ensaio de tração se distribuem ao longo de uma massa uniforme e sólida, isto é, em uma estrutura interna livre de vazios. Além dos vazios, nas peças impressas as forças são suportadas basicamente por filamentos individuais, uma vez que entre

estes existem linhas de união que se caracterizam por regiões fracas e que não suportam cargas, mesmo na configuração unidirecional (C3) em que se obtiveram os melhores resultados.

A sensível diferença observada no grau de cristalinidade da peça em PLA injetada em relação à impressa, no sentido de crescimento, não foi um fator determinante para aumentar a rigidez (módulo de *Young*) destas, apesar de a literatura descrever que o módulo de elasticidade tende a aumentar conforme aumenta a cristalinidade (CANEVAROLO, 2006). Neste estudo as características naturais induzidas pelo processo de Impressão 3D (vazios e linhas de união) foram responsáveis por gerarem peças com baixa capacidade de deformação em resposta à aplicação de cargas, principalmente na porção elástica da curva tensão deformação quando comparadas às injetadas, o que colabora para o aumento do módulo de *Young* —Figura 92 (a) e (b).

Outras evidências encontradas no trabalho sustentam esta descoberta: (i) mesmo as peças impressas em condições (C1 e C2) que geraram menores valores de resistência máxima à tração e módulo de *Young* em comparação às amostras com melhores resultados (C3), e que não foram analisadas em relação à cristalinidade, apresentaram maior rigidez que as amostras injetadas; e (ii) mesmo no PETG, que é um material amorfo e, portanto, não dispõe de efeitos de cristalização, as peças impressas apresentaram um comportamento de superioridade na rigidez em comparação aos componentes injetados com o mesmo material.

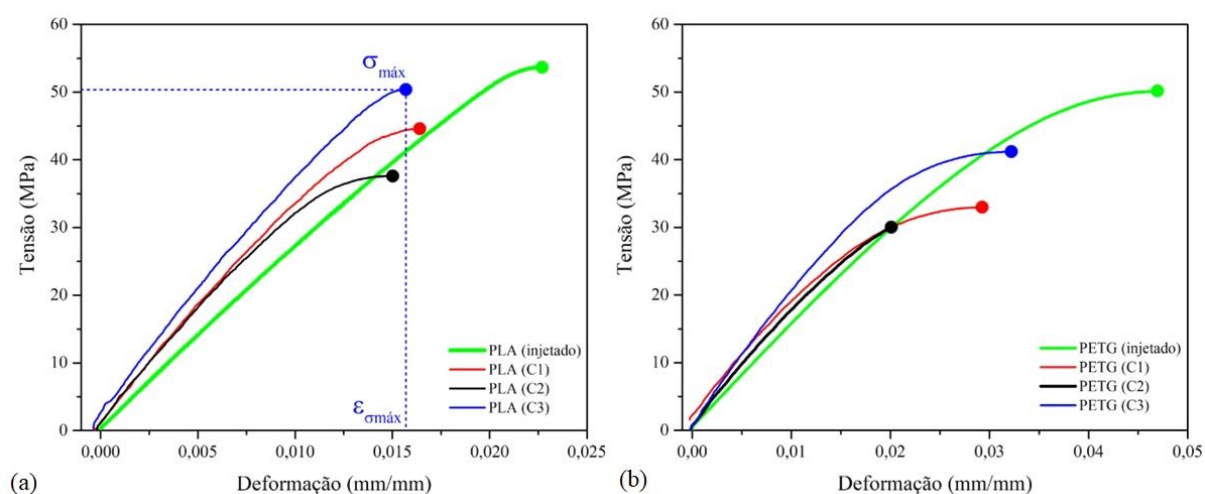


Figura 92 – Curvas de tensão deformação, amostras impressas e injetada: (a) PLA e (b) PETG.

Por fim, as análises químicas (FTIR) mostraram que a estrutura molecular dos polímeros não foi alterada pelos processos de fabricação aos quais os materiais foram submetidos. Portanto, colaboram para a constatação de que as diferenças no comportamento mecânico das

peças impressas e injetadas são decorrentes de efeitos das tecnologias na qualidade estrutural (sobre o aspecto construtivo) das peças obtidas.

### 3.4.3 Conclusão sobre a caracterização dos materiais

A caracterização do PETG permitiu verificar que as propriedades térmicas, químicas e mecânicas do filamento eram semelhantes às deste material quando aplicado a outros contextos, que não especialmente a Manufatura Aditiva. Assim se atingiu o objetivo principal deste estudo, fornecer informações relevantes sobre o material de recente adoção no contexto abordado. As mesmas considerações podem ser feitas quanto ao PLA. Os benefícios do estudo para os usuários da tecnologia podem ser resumidos em: (i) melhoramento da configuração dos parâmetros de processo de Impressão 3D; (ii) base para desenvolvimento e comparação entre estudos na área de caracterização de materiais; (iii) informações para o projeto e desenvolvimento de peças funcionais, além do processo de seleção dos materiais; (iv) aplicação de referências generalistas dos polímeros no contexto da Manufatura Aditiva; (v) reconhecimento da qualidade dos materiais dos fornecedores, quando comparados aos descritos na literatura.

Comparativamente, o PLA mostrou-se um material mais resistente e rígido que o PETG, tanto nas peças impressas quanto nos corpos de prova injetados. O PLA, na melhor condição de impressão (C3), apresentou maior proximidade aos valores de tensão máxima obtidos nas peças injetadas. Esta mesma condição gerou resultados de tensão máxima estatisticamente semelhantes aos do PETG injetado. Por outro lado, o PETG apresenta algumas vantagens em relação ao PLA: (i) maior resistência à degradação térmica, (ii) tendência à maior estabilidade térmica, visto que seu comportamento térmico foi pouco afetado pelas variáveis envolvidas nos processos de fabricação aos quais foram submetidos neste trabalho; (iii) na maior parte das respostas avaliadas neste estudo, o PETG apresentou menor dispersão estatística que o PLA; (iv) a flexibilidade apresentada pelo PETG o torna interessante, principalmente na Impressão 3D, para aplicações que necessitam desta característica, como por exemplo, a construção de conexões do tipo *snap-fit*, em oposição ao PLA que é muito mais rígido.

Os resultados encontrados retratam ainda a evolução da Impressão 3D baseada em extrusão, motivada pelo surgimento dos sistemas de código aberto e das máquinas de baixo custo, que permitiram que o processo e suas variáveis (parâmetros, equipamentos, *softwares*, materiais) pudessem ser estudados por uma vasta gama de especialistas e entusiastas e assim encontrar soluções para melhorar a qualidade dos produtos gerados e direcionar a tecnologia

para caminhos de aplicação final. Dentre as colaborações deste estudo, além de trazer mais informações sobre os materiais, mostrou ser possível alcançar resistências mecânicas à tração com valores de 69% a 93% das fornecidas por componentes injetados em PLA, e de 65% a 83% no PETG, através do ajuste dos parâmetros de processo, valores equiparáveis ou mesmo superiores aos apresentados na publicação de Ahn *et al.* (2002), 65% a 73%, no ano de 2002.

### 3.5 ANÁLISE DE SUPERFÍCIES IMPRESSAS

As superfícies geradas pelo processo de Impressão 3D foram avaliadas sob dois aspectos: coeficiente de atrito estático e medição da rugosidade. Ambos foram investigados uma vez que apresentam influência no mecanismo de funcionamento das conexões *snap-fit*. Os tópicos a seguir apresentam conceitos básicos sobre o atrito, procedimentos metodológicos aplicados nas análises, além das discussões dos resultados e as principais considerações a respeito dos estudos.

#### 3.5.1 Conceitos sobre o atrito

O atrito caracteriza-se por uma força que sempre atua quando duas superfícies estão em contato e com tendência de movimento. Em outras palavras, o atrito pode ser descrito como uma força paralela à superfície de contato entre dois corpos e oposta ao movimento relativo entre estes (CORRADI *et al.*, 2010).

Assumindo como exemplo um bloco em repouso sobre uma superfície horizontal, conforme mostrado na Figura 93 (a), ao se aplicar uma força  $F$  ao bloco, este tende a se mover, porém não consegue. Este efeito ocorre porque o atrito entre o bloco e a superfície sobre a qual está repousado gera uma força que atua sobre o mesmo, igual e oposta à  $F$ . A força de atrito entre duas superfícies em repouso, uma em relação à outra, é denominada **força de atrito estático** ( $f_e$ ). Se não há nenhuma força aplicada ao bloco, não há força de atrito sobre este — Figura 93 (a). Entretanto, há reação normal, devido ao peso do bloco. A força normal, efetuada pela superfície no bloco, é igual em magnitude ao peso ( $N=P$ ). A maior força de atrito estático ( $f_{e\text{ máx}}$ ) corresponde ao nível de força que deve ser aplicado para que o bloco comece a se mover — Figura 93 (c). Quando este valor máximo é ultrapassado, o atrito não consegue mais gerar uma força contrária intensa o suficiente para impedir o movimento do bloco. A partir do momento em que o bloco começa a se mover, isto é, com uma superfície em movimento em



relação à outra, a **força de atrito passa a ser cinética ( $f_c$ )** — Figura 93 (d) (YOUNG e FREEDMAN, 2009; CORRADI *et al.*, 2010; HALLIDAY *et al.*, 2011).

De acordo com os autores, experimentos mostram que em muitos casos a força de atrito estático máxima é aproximadamente proporcional à força de reação normal ( $N$ ) e o fator de proporcionalidade entre elas é chamado de **coeficiente de atrito estático ( $\mu_e$ )** — Eq. (5). Segundo Corradi *et al.* (2010), como a força de atrito estático é sempre maior que a do cinético, consequentemente o coeficiente de atrito estático vai ser sempre superior ao cinético.

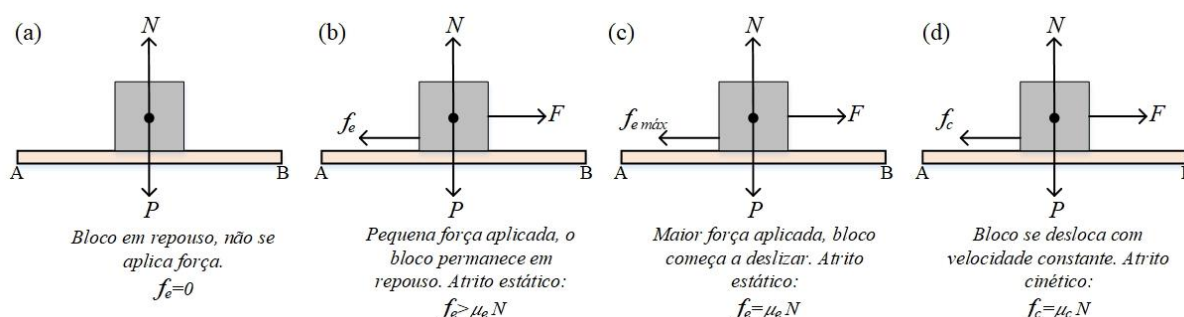


Figura 93 – Comportamento do atrito em um bloco (adaptado de YOUNG e FREEDMAN, 2009; CORRADI *et al.*, 2010).

$$f_e = \mu_e N \quad \text{Eq. (5)}$$

Um método simples para estimar o coeficiente de atrito estático ( $\mu_e$ ), para qualquer material, consiste em elevar um extremo de um plano AB até que o bloco ( $m$ ) comece a escorregar. A inclinação do plano corresponde ao “ângulo de atrito” (*angle of friction*), ou “ângulo de repouso” (*angle of repose*) ( $\theta$ ), e o valor de  $\mu_e$  é equivalente à tangente deste mesmo ângulo. Em outras palavras: se um bloco com peso  $P$  encontra-se em equilíbrio com um plano inclinado fazendo um ângulo ( $\theta$ ) com o horizontal, a força de atrito é descrita como  $f_e = P \sin(\theta)$  e a força normal como  $N = P \cos(\theta)$ . Sendo assim,  $f_e/N = \tan(\theta)$  (CULLER, 1909; COHEN, 2012; GNECCO e MEYER, 2015). O conceito descrito é apresentado na Figura 94.

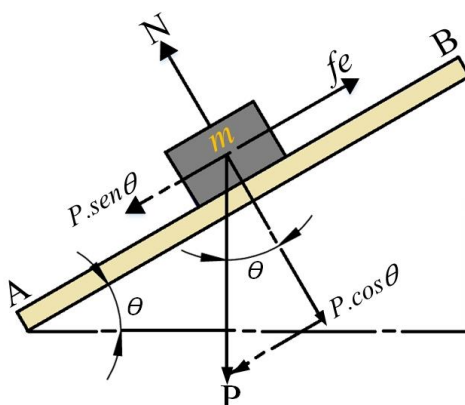


Figura 94 – Conceito do plano inclinado.

### 3.5.2 Procedimentos metodológicos

O coeficiente de atrito estático ( $\mu_e$ ) foi medido neste estudo com base no conceito do plano inclinado descrito anteriormente. Para tal, foram desenvolvidos dois modelos de peça: (i) o bloco padrão, caracterizado por um cubo com dimensões de (60 x 60 x 60) mm; e (ii) a “superfície de interação”, determinada por uma placa de (95 x 120 x 4) mm. Ambas as peças foram impressas, em PLA e PETG, com diferentes ângulos de varredura ( $\hat{A}V$ )<sup>37</sup>, em um total de três níveis (0°, 90°, 45°), com o objetivo de gerar superfícies com diferentes texturas. Sobre o aspecto de textura, o ângulo de deposição dos filamentos ( $\hat{A}V$ ) foi denominado neste estudo como o “ângulo de superfície ( $\hat{A}_s$ )”. Foram fabricadas três “superfícies de interação” para cada material, cada uma delas correspondente a um dos níveis de  $\hat{A}V$  referidos anteriormente (Figura 95).

No caso do cubo (o bloco padrão deste estudo), sua geometria formada por seis faces iguais, em conjunto com estratégias de construção do processo de Impressão 3D, permitiu que através da rotação em torno de seus eixos principais todas as texturas pudessem ser feitas em um único elemento (Figura 96). A face do topo foi construída por uma estratégia do tipo contorno — reprodução dos perímetros da peça, região em amarelo na Figura 97 (c) — combinada com uma de preenchimento do tipo raster (*rectilinear* no Slic3r) — região em vermelho na Figura 97 (c) —, associada neste estudo a um ângulo de varredura de 45°. Tal configuração gerou a superfície com a textura para  $\hat{A}_s$  igual a 45°, Figura 96 (a).

<sup>37</sup> Nomenclatura associada a um parâmetro configurável no processo de Impressão 3D por extrusão. Especificamente no *software* Slic3r chamado de “fill angle”. Nesta parte do estudo, quando mencionado, estará relacionado ao processo de parametrização ou construtivo.

Já as faces laterais do cubo foram fabricadas majoritariamente por trajetórias de deposição que reproduzem o perfil da peça ao longo da direção de empilhamento das camadas, resultando na produção de filamentos alinhados e a  $90^\circ$  em relação ao eixo Z nos planos XZ e ZY— Figura 97 (b) e (c). Sendo assim, ao se girar o cubo, conseguiu-se em uma única face as texturas para os ângulos de superfície de  $90^\circ$  e  $0^\circ$ , Figura 96 (b) e (c).

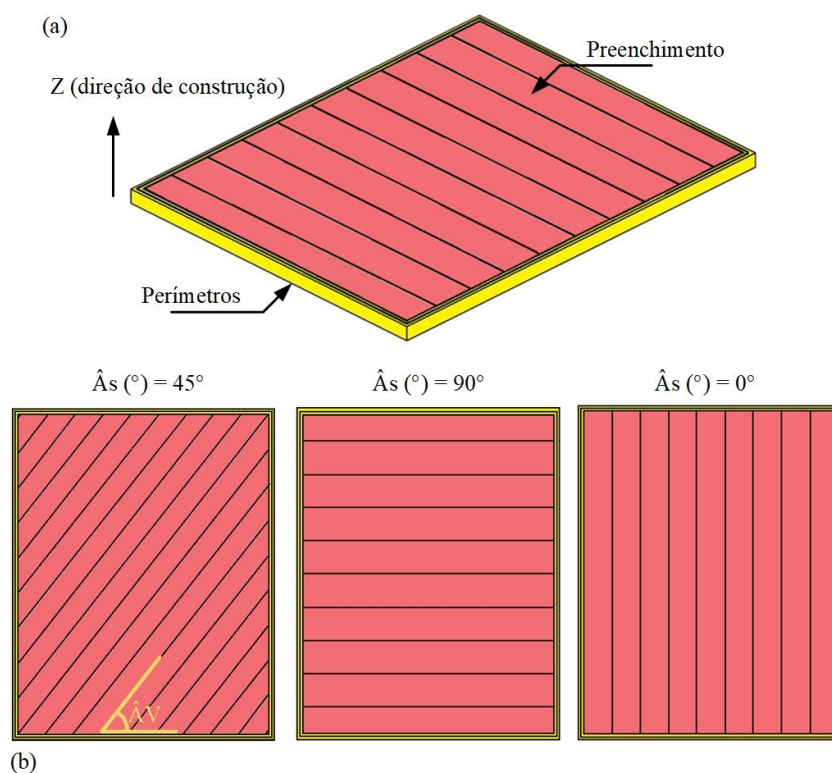


Figura 95 – Orientação de construção da “superfície de interação” (a) e (b) texturas.

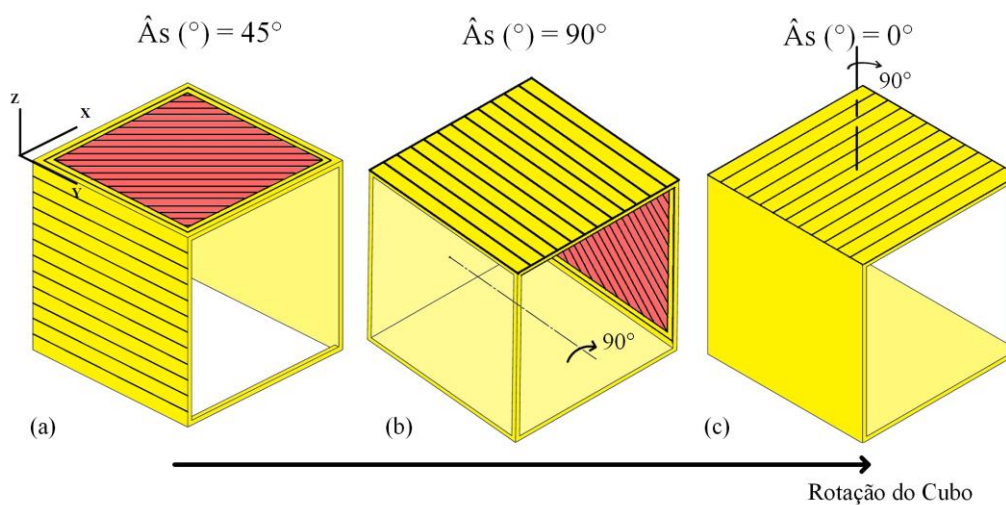


Figura 96 – Rotação do “Bloco Padrão” (cubo) e as diferentes texturas: (a)  $45^\circ$ , (b)  $90^\circ$  e (c)  $0^\circ$ .

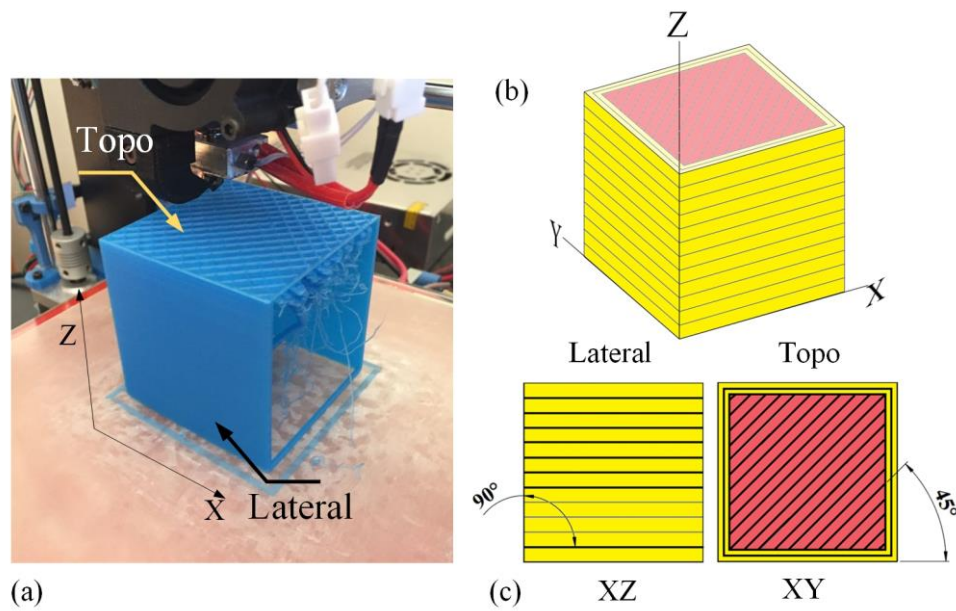


Figura 97 – Cubo durante o processo de impressão (a), planos XZ e YZ (b), faces lateral e topo (c).

O coeficiente de atrito estático entre as peças impressas foi medido em nove condições de contato, conforme descrito na Tabela 29, entre o “bloco padrão” e a “superfície de interação”. Para cada combinação foram realizadas cinco medições.

Tabela 29 – Condições para medição do coeficiente de atrito estático.

Condições	$\hat{A}_s(^{\circ})$ : “Superfície de interação”	$\hat{A}_s(^{\circ})$ : “Bloco Padrão”
C1	0	0
C2	0	45
C3	0	90
C4	45	0
C5	45	45
C6	45	90
C7	90	0
C8	90	45
C9	90	90

Como sistema de medição para o experimento foi utilizado um conjunto de elementos formado por um plano inclinado para aplicações didáticas em física, um elemento para gerar deslocamento e um inclinômetro digital (*Floureon STDJ-103*, com resolução  $0,1^{\circ}$ ) para a medição do “ângulo de repouso” (Figura 98). Basicamente o procedimento consistiu em: (i) colar a “superfície de interação” sobre o plano inclinado (com uma fita dupla face); (ii) colocar o cubo (“bloco padrão”) em uma posição inicial de equilíbrio; (iii) gerar um movimento linear com o elemento de deslocamento (seta amarela na Figura 98), para que este gerasse um movimento angular no plano inclinado (seta verde na Figura 98); (iv) observar o mínimo

deslocamento do bloco em relação à superfície e aferir o valor do ângulo medido pelo inclinômetro.

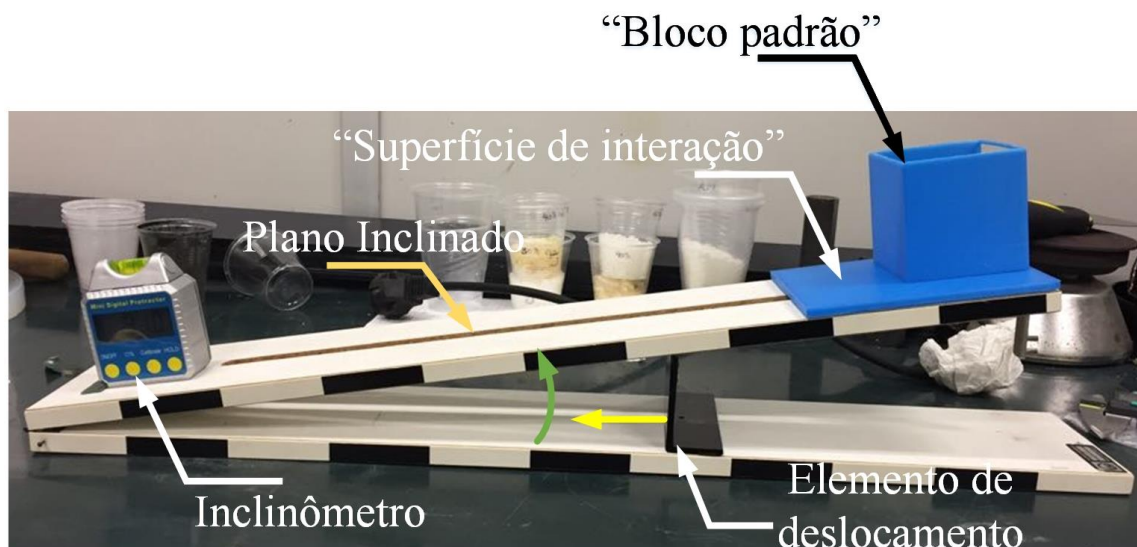


Figura 98 – Aparato para a medição do coeficiente de atrito estático.

O cubo foi projetado para ser oco e duas de suas faces foram suprimidas para que o acesso ao interior da peça fosse possível em qualquer orientação do elemento para o ensaio. A estratégia foi adotada para que uma massa extra fosse adicionada ao cubo, pastilhas metálicas da Figura 99, visando garantir e estabilizar o contato entre o “bloco padrão” e a “superfície de interação” durante o experimento. Na Tabela 30 são especificadas as massas do conjunto de elementos metálicos (“extra”) e a dos cubos, além do somatório de ambas.

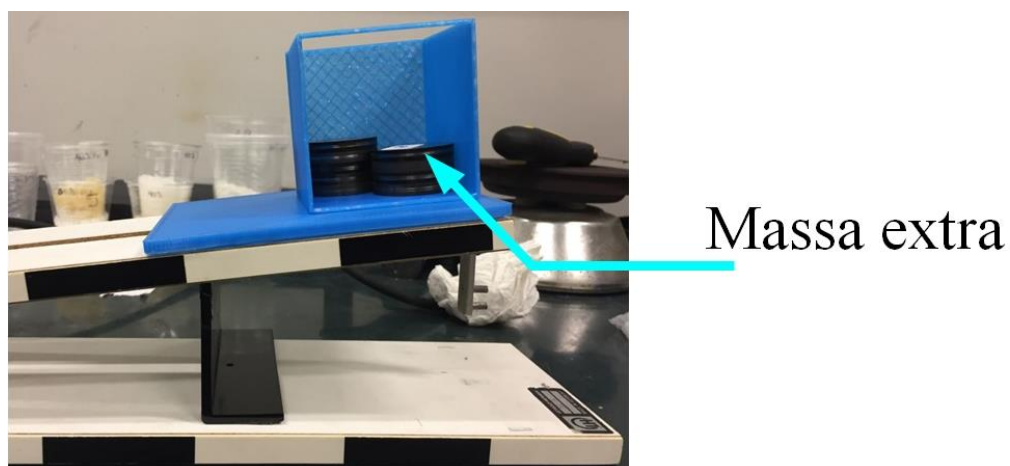


Figura 99 – Massa extra adicionada ao “bloco padrão”.



Tabela 30 – Massa dos elementos relacionados ao “bloco padrão”.

Elemento	Massa (g)	
	PLA	PETG
Cubo	22,8	23,3
Extra	216,5	216,5
Total	239,3	239,8

Por fim, foi medida a rugosidade média ( $R_a$ ), com os diferentes ângulos de deposição, dos cubos (“blocos padrão”) e das “superfícies de interação” — Figura 100 (a) e (b) — em PLA e PETG. Para tal, foi utilizado um perfilômetro *HOMMELWERKER Lv-50* em conjunto com um apalpador modelo *TKL 300/17* ( $\pm 300\mu\text{m}$ ). Em cada face das peças foram realizadas três medições, com velocidade de ensaio de 0,5 mm/s e extensão percorrida pelo apalpador ( $L_t$ ) de 4,8 mm. A direção de medição em relação ao ângulo de deposição dos filamentos nas superfícies é representada na Figura 101.

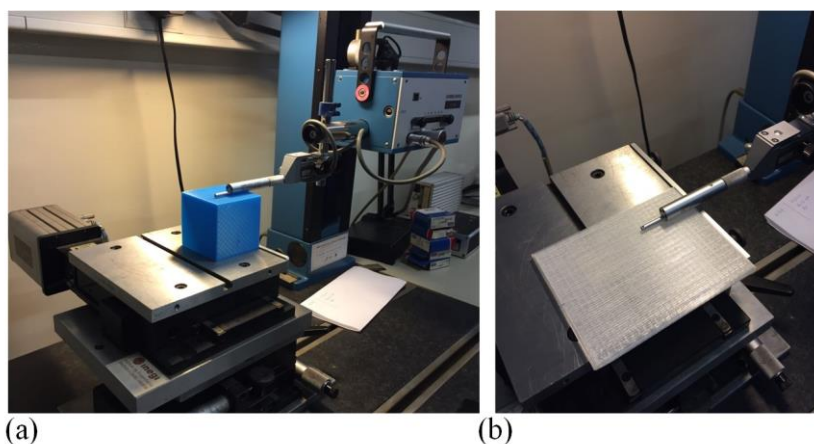
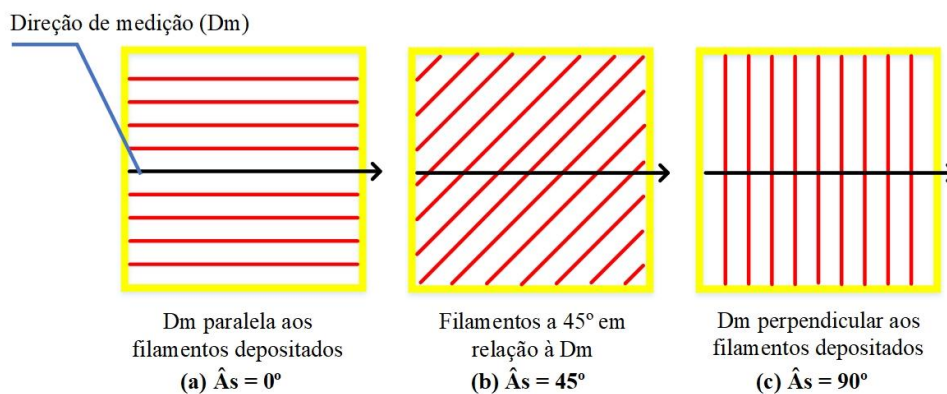


Figura 100 – Medição da rugosidade: (a) cubo e (b) superfície de interação.

Figura 101 – Direção de medição da rugosidade ( $R_a$ ).

### 3.5.3 Resultados e discussões

Os valores médios do coeficiente de atrito estático, para as diferentes condições de interação, obtidos através do método do plano inclinado são apresentados na Tabela 31, para o PLA e o PETG.

Tabela 31 – Coeficiente de atrito estático médio para as diferentes condições de interação.

Condições	PLA	PETG
	$\mu_e$ médio	$\mu_e$ médio
C1	$0,14 \pm 0,010$	$0,14 \pm 0,006$
C2	$0,17 \pm 0,006$	$0,16 \pm 0,003$
C3	$0,12 \pm 0,006$	$0,14 \pm 0,013$
C4	$0,16 \pm 0,007$	$0,13 \pm 0,005$
C5	$0,23 \pm 0,011$	$0,17 \pm 0,009$
C6	$0,16 \pm 0,006$	$0,14 \pm 0,005$
C7	$0,14 \pm 0,005$	$0,16 \pm 0,009$
C8	$0,17 \pm 0,015$	$0,21 \pm 0,014$
C9	$0,38 \pm 0,030$	$0,20 \pm 0,012$

As respostas apresentadas na Tabela 31 foram avaliadas pelo método da análise de variância (ANOVA), conforme descrito na Tabela 32.

Tabela 32 – Análise de variância ( $\alpha=95\%$ ) para o coeficiente de atrito estático ( $\mu_e$ ).

Fatores	gl	ANOVA PLA ( $\mu_e$ )			
		SQ	V	F	P
$\hat{A}_s$ Sup. Interação ( $^\circ$ )	2	0,057	0,029	187,88	0,0001
$\hat{A}_s$ Bloco padrão ( $^\circ$ )	2	0,037	0,018	120,44	0,0001
*Interação	4	0,144	0,036	237,95	0,0001
Erro	36	0,005	0,0002	1	
Total	44	0,243			
Fatores	gl	ANOVA PETG ( $\mu_e$ )			
		SQ	V	F	P
$\hat{A}_s$ Sup. Interação ( $^\circ$ )	2	0,018	0,009	100,66	0,0001
$\hat{A}_s$ Bloco padrão ( $^\circ$ )	2	0,008	0,004	47,98	0,0001
*Interação	4	0,004	0,001	11,60	0,0001
Erro	36	0,003	0,0001	1	
Total	44	0,033			

Nota: \*Interação =  $\hat{A}_s$  (Sup. Interação) x  $\hat{A}_s$  (Bloco padrão)

Através da ANOVA foi possível constatar que estatisticamente, para ambos os materiais, os efeitos do ângulo de superfície do “bloco padrão” e da “superfície de interação” foram significativos para a variação do coeficiente de atrito estático. Além da influência dos fatores individualmente, a análise estatística demonstrou também (para o PLA e o PETG) a relevância da interação entre estes para a variação da resposta. Esta última constatação é muito importante

para o contexto dos *snap-fits*, uma vez que permite identificar quais combinações entre ângulos de superfície geraram o menor coeficiente de atrito, auxiliando assim no planejamento da construção dos elementos da conexão.

As médias associadas às interações entre os níveis de Âs da “superfície de interação” com os níveis de Âs do “bloco padrão” foram comparadas através do teste de *Scott-Knott*<sup>38</sup> ( $\alpha=95\%$ ), e os resultados são apresentados nas Tabelas 33 e 34, respectivamente para o PLA e o PETG. As médias com a mesma letra minúscula nas colunas, e com as mesmas letras maiúsculas nas linhas, são iguais estatisticamente. Uma análise visual dos resultados da interação entre os níveis das variáveis pode ser observada nos mapas de cores da Figura 102 (a) (PLA) e (b) (PETG).

Tabela 33 – Teste de *Scott-Knott*<sup>39</sup> para as interações, PLA.

Âs “Sup. interação”	Âs “Bloco padrão”		
	0°	45°	90°
0°	0,14 b B	0,17 b A	0,12 c C
45°	0,16 a B	0,23 a A	0,16 b B
90°	0,14 b C	0,17 b B	0,38 a A

Nota:

- As colunas da Tabela correspondem ao desdobramento dos níveis de Âs “Sup. interação” dentro dos níveis de Âs “Bloco padrão”;

- As linhas da Tabela correspondem ao desdobramento dos níveis de Âs “Bloco padrão” dentro dos níveis de Âs “Sup. interação”.

Tabela 34 – Teste de *Scott-Knott* para as interações, PETG.

Âs “Sup. interação”	Âs “Bloco padrão”		
	0°	45°	90°
0°	0,14 b B	0,16 c A	0,14 b B
45°	0,13 c C	0,17 b A	0,14 b B
90°	0,16 a B	0,21 a A	0,20 a A

<sup>38</sup> Quando a análise de variância (ANOVA) indica que a hipótese nula (H0) deve ser rejeitada, isto é, que existem diferenças entre as médias associadas aos níveis, é então necessário identificar quais os níveis ou a combinação entre eles, que se diferem estatisticamente. Nesses casos, são utilizados métodos de comparação múltipla. Entretanto, muitas vezes os resultados gerados por estes métodos são difíceis de interpretar, devido as suas ambiguidades. Uma alternativa eficiente, principalmente quando são analisados muitos tratamentos, consiste no uso do teste de Scott-Knott (SCOTT e KNOTT, 1974) (BHERING *et al.*, 2008; PEREIRA, 2011). O teste de Scott-Knott é um algoritmo de agrupamento hierárquico usado como ferramenta exploratória de análise (JELIHOVSCHI *et al.*, 2014), e tem dentre as suas finalidades separar as médias em grupos distintos, através da redução da variação dentro dos grupos e da maximização da variação entre grupos (PRESOTTI e BARRETO, 2009).

<sup>39</sup> Os testes de *Scott-Knott* foram realizados no software *Sisvar* 5.6: FERREIRA, Daniel Furtado. *Sisvar*. 2015. Disponível em: <<http://www.dex.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>>. Acesso em: 20 fev. 2018.



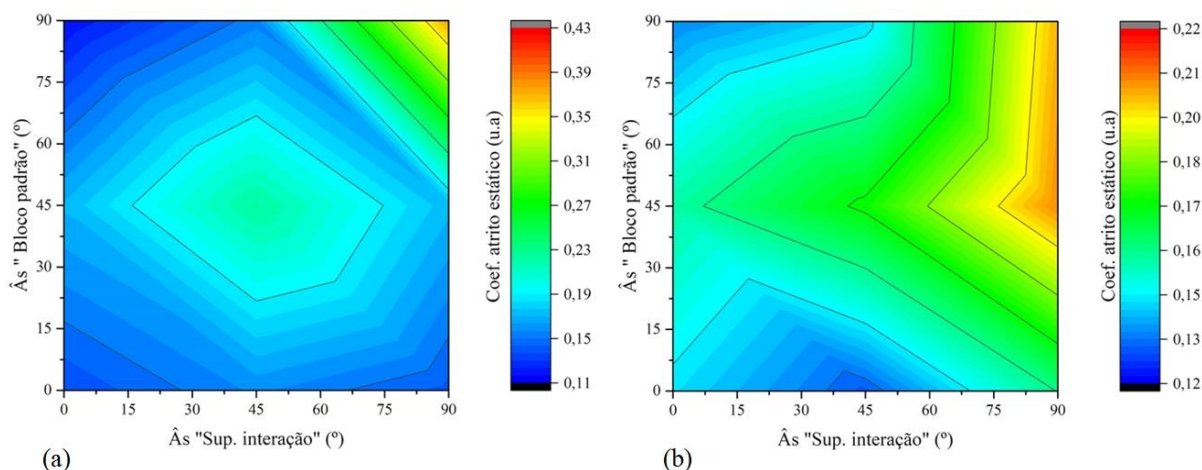


Figura 102 – Mapa de cores para a relação entre os níveis de Âs “Sup. interação” e Âs “Bloco padrão”, (a) PLA e (b) PETG.

Com base nos resultados da Tabela 33, para o PLA é possível verificar que estatisticamente os menores valores para o coeficiente de atrito estático são obtidos quando se combina o ângulo da superfície de interação em 0° com a face do bloco padrão em 90° (0°|90°)<sup>40</sup> ( $\mu_e = 0,12$ ). Na sequência, com médias iguais de acordo com o método de *Scott-Knott*, um baixo valor de  $\mu_e$  é observado para as combinações 0°|0° (0,14) e 90°|0° (0,14). Os valores críticos de  $\mu_e$ , destacados pelas regiões central e superior direita no mapa de cores da Figura 102 (a), encontram-se nas respostas geradas pelas interações 45°|45° e 90°|90°, respectivamente com 0,23 e 0,38. Comparativamente, os resultados obtidos nas situações críticas são aproximadamente 2 ( $\approx +88\%$ ) (para 45°|45°) e 3 ( $\approx +214\%$ ) (para 90°|90°) vezes maiores que o menor coeficiente de atrito analisado em 0°|90°.

No caso do PETG, Tabela 34, a condição responsável pelo menor valor  $\mu_e$  foi a interação 45°|0°, com aproximadamente 0,13. Outras duas condições de interação também geraram baixos valores de  $\mu_e$ : 0°|0° e 0°|90°, ambas com médias em torno de 0,14. Diferentemente do PLA, o mapa de cores do PETG, Figura 102 (b), mostra uma maior área associada a valores críticos de coeficiente de atrito estático. Tal efeito pode ser relacionado ao fato de que, neste material, três condições de interação colaboraram para os maiores valores de  $\mu_e$ : 45°|45° (0,17), 90°|45° (0,21) e 90°|90° (0,20) — as duas últimas com igualdade estatística de acordo com o teste de *Scott-Knott* (Tabela 34). Comparando os valores críticos com a média dos valores em 45°|0°, verificou-se um aumento em  $\mu_e$  de aproximadamente 32%, 54% e 57%, respectivamente para 45°|45°, 90°|90° e 90°|45°, diferenças menores que as observadas para o PLA.

<sup>40</sup> Código utilizado para representar a interação entre os ângulos de superfície das peças, o qual deve ser interpretado: Âs “Superfície de interação” | Âs “Bloco padrão”.

Uma comparação entre o PLA e o PETG é apresentada na Figura 103 para diferentes valores de coeficiente de atrito estático: baixo (a), intermediário (b) e alto (c).

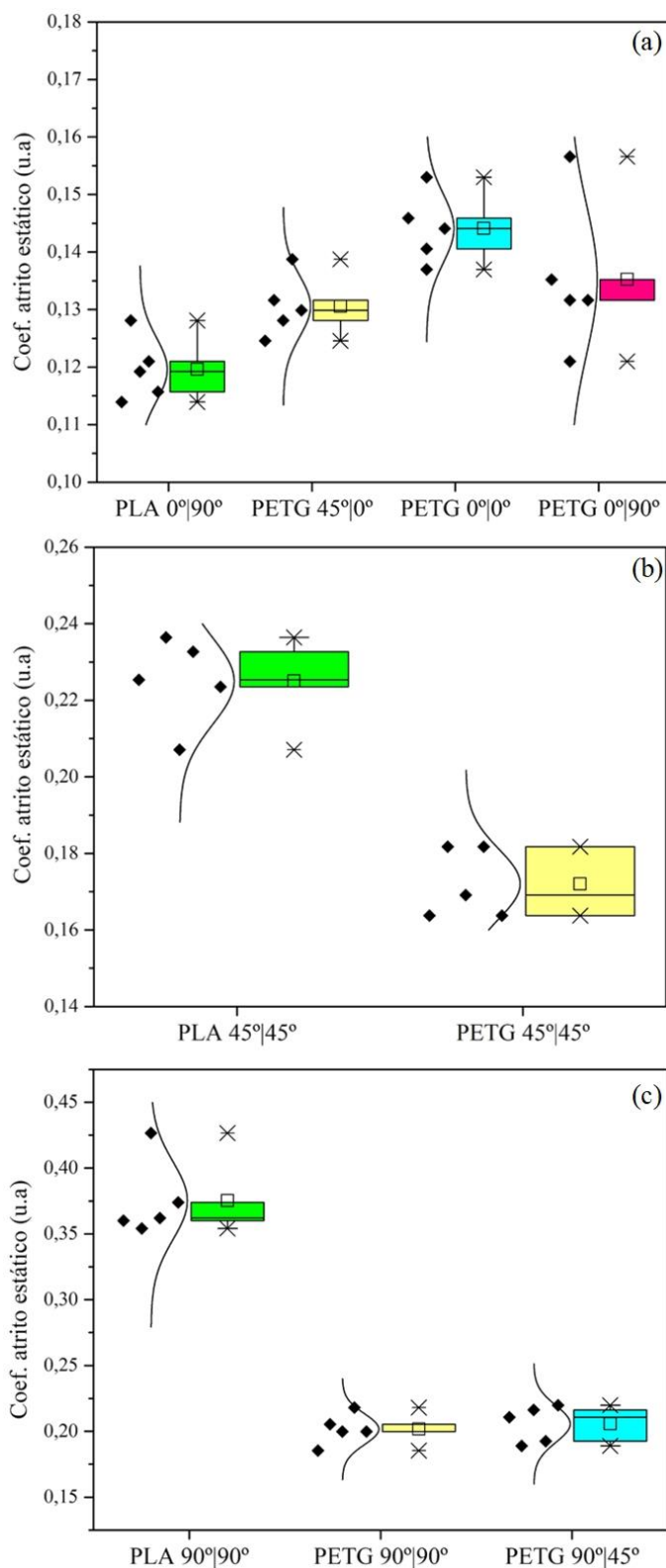


Figura 103 – Comparação entre PLA e PETG para os valores de  $\mu_e$ : (a) baixo, (b) intermediário e (c) alto.

As médias de cada situação apresentada na Figura 103 foram comparadas através do teste de *t-Student*<sup>41</sup>, que constatou que o PLA, na melhor configuração de interação entre os ângulos de face da “superfície de interação” e do “bloco padrão” (0°|90°), apresenta, estatisticamente, menores valores de coeficiente de atrito do que o PETG nas condições 45°|0° (≈-8%), 0°|0° (≈-17%) e 0°|90° (≈-12%)— Figura 103 (a). Nas situações críticas, o comportamento se inverte, e o PLA supera os valores do PETG em todas as comparações: (i) em 45°|45° o coeficiente de atrito estático no PLA é aproximadamente 31% maior que o PETG na mesma condição — Figura 103 (b) —; e (ii) o valor de  $\mu_e$  do PLA na condição 90°|90° é cerca de 86% maior que o do PETG em 90°|90° e 82% em 90°|45°— Figura 103 (c).

Seguindo a apresentação dos resultados, na Tabela 35 são disponibilizados os valores de rugosidade ( $R_a$ ) para cada uma das configurações de face (construídas com diferentes ângulos de deposição dos filamentos) das superfícies de interação e dois blocos padrão, em PLA e PETG. As respostas foram avaliadas pelo método da análise de variância, conforme apresentado na Tabela 36.

Tabela 35 – Resultados da medição da rugosidade das peças em PLA e PETG.

Material	“Superfície de interação” – $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )			“Bloco padrão” – $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
PLA	1,48 ± 0,38	7,30 ± 0,87	16,54 ± 2,95	0,45 ± 0,09	13,71 ± 0,41	15,30 ± 0,45
PETG	1,46 ± 0,35	5,39 ± 0,30	10,49 ± 2,49	0,66 ± 0,07	13,90 ± 0,89	15,24 ± 0,20

Tabela 36 – Análise de variância ( $\alpha=95\%$ ) para a rugosidade, PLA e PETG.

Fatores	ANOVA PLA ( $R_a$ “Sup. Interação”)				
	gl	SQ	V	F	P
Ângulo de varredura (°)	2	346,2	173,1	54,1	0,0001
Erro	6	19,2	3,2	1	
Total	8	365,4			
Fatores	ANOVA PLA ( $R_a$ “Bloco padrão”)				
	gl	SQ	V	F	P
Ângulo de varredura (°)	2	398,8	199,4	1575,9	0,0001
Erro	6	0,8	0,1	1	
Total	8	399,5			
Fatores	ANOVA PETG ( $R_a$ “Sup. Interação”)				
	gl	SQ	V	F	P
Ângulo de varredura (°)	2	122,8	61,4	28,7	0,0008
Erro	6	12,8	2,1	1	
Total	8	135,7			
Fatores	ANOVA PETG ( $R_a$ “Bloco padrão”)				
	gl	SQ	V	F	P
Ângulo de varredura (°)	2	389,7	194,8	704,9	0,0001
Erro	6	1,7	0,3	1	
Total	8	391,3			

<sup>41</sup> Disponível no Apêndice A.

As médias da rugosidade, para o PLA e o PETG, por fator e níveis, são apresentadas na Figura 104 (a) (“superfície de interação”) e (b) (“bloco padrão”).

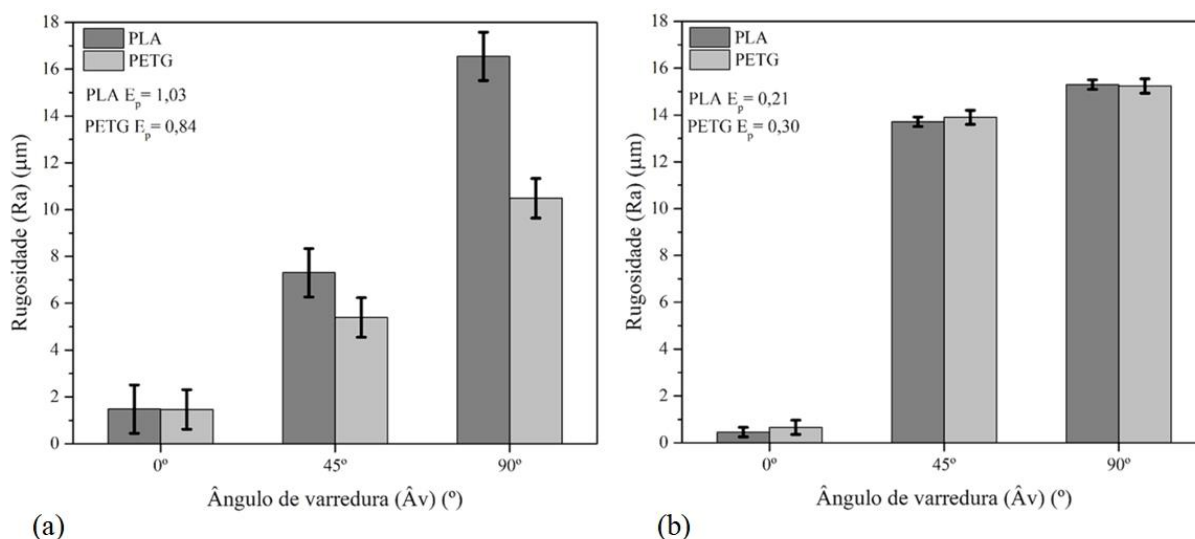


Figura 104 – Médias da rugosidade ( $R_a$ ) em função de  $\hat{A}_v$  e seus níveis: (a) “superfície de interação” e (b) “bloco padrão”.<sup>42</sup>

De acordo com os resultados da análise de variância é possível verificar, para ambos os materiais, que o ângulo de varredura foi significativo para a variação da rugosidade ( $R_a$ ). Os dois gráficos da Figura 104 mostram um aumento da rugosidade das superfícies construídas com  $\hat{A}_v$  igual a 0° na direção das construídas com 90° — de forma mais equilibrada no caso das “superfícies de interação” (a) e com rugosidades próximas para 45° e 90° no bloco padrão (b). Comparativamente, no PLA, o valor médio da rugosidade para a “superfícies de interação” construída com ângulo de deposição de 90° é cerca de 2 e 11 vezes maior que a rugosidade nas configurações em 45° e 0°. Para o PETG, na mesma comparação, os valores são aproximadamente 2 e 7 vezes.

No caso das faces do “bloco padrão” em PLA, a média da rugosidade da superfície com filamentos em 90° é em torno de 1,12 e 34 vezes maior que as regiões em 45° e 0°, respectivamente. A peça em PETG apresenta um valor médio de rugosidade na face em 90°, 1,10 e 23 vezes, nesta ordem, superior aos analisados nas áreas em 45° e 0°. Concorde-se assim com os patamares observados no gráfico da Figura 104 (b), isto é, de proximidade entre as médias da rugosidade entre 45° e 90°, e de grande diferença de ambas com 0°.

<sup>42</sup>  $E_p$ : erro padrão.

Os efeitos da variação da rugosidade das superfícies com o ângulo de deposição dos filamentos podem estar relacionados ao fator construtivo em sintonia com o procedimento de medição (direção de medição, Figura 101). As superfícies fabricadas com  $\hat{A}_v$  em  $45^\circ$  e  $90^\circ$  — com mais relevância na última configuração —, permitem que, para a direção de medição de rugosidade utilizada, o apalpador se desloque ao longo das faces, transitando entre os picos e os vales formados pelos filamentos vizinhos depositados — Figura 105 (a). Esta característica é responsável pelos maiores valores de  $R_a$  observados nas configurações de construção citadas e descrevem de uma forma mais realística a qualidade das superfícies geradas no processo.

Por outro lado, nas faces fabricadas com  $\hat{A}_v$  em  $0^\circ$ , os baixos valores de  $R_a$  encontrados podem ser traduzidos como a medida da rugosidade da superfície no topo de um filamento depositado, ou em regiões do vale entre dois filamentos — Figura 105 (b). Isso acontece porque os filamentos depositados se encontram orientados paralelamente à direção de medição da rugosidade.

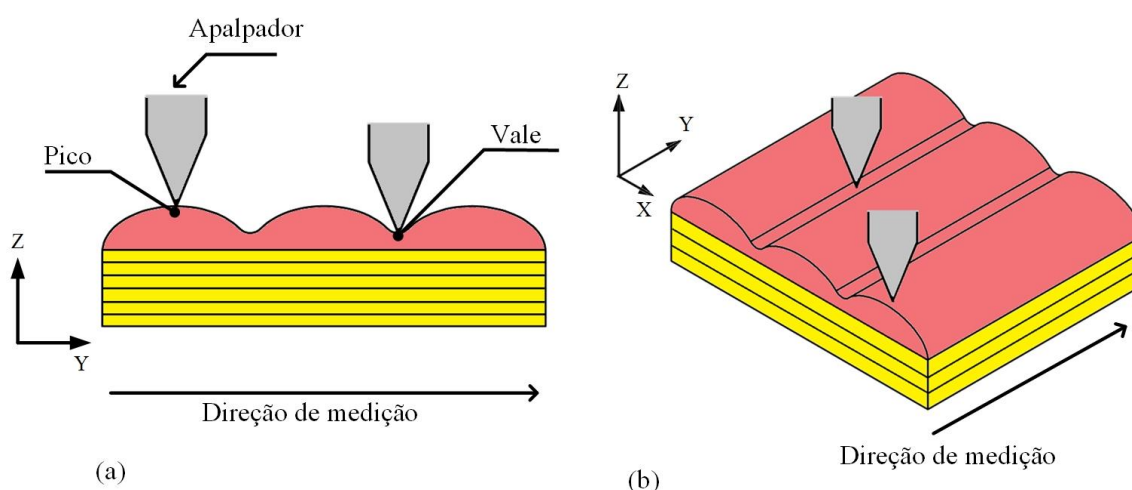


Figura 105 – Efeitos da direção de medição nos resultados da rugosidade: (a)  $\hat{A}_v = 90^\circ$  e (b)  $\hat{A}_v = 0^\circ$ .

Alsoufi e Elsayed (2017), diferentemente do presente trabalho, não variaram o ângulo de deposição dos filamentos na construção das superfícies das peças, mas avaliaram a rugosidade ( $R_a$ ) em função do diâmetro do bico, da espessura de camada e, principalmente, de diferentes direções de medição: (i) paralela à direção de construção ( $0^\circ$ ); (ii) perpendicular à direção de construção ( $90^\circ$ ); e (iii) diagonal à direção de construção ( $45^\circ$ ). De acordo com os resultados apresentados, uma peça fabricada com um bico de 0,3mm de diâmetro e com espessura de camada de 0,2 mm em PLA dispõe de uma rugosidade ( $R_a$ ) média de aproximadamente  $1,08 \pm 0,30 \mu\text{m}$ , quando medida em  $0^\circ$ . Para esta mesma peça, nas direções de medição de  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ,

os valores médios da rugosidade aumentam, respectivamente, para  $23,98 \pm 1,19 \mu\text{m}$  e  $21,78 \pm 0,63 \mu\text{m}$ . Segundo os autores, isso mostra que a direção de medição tem influência significativa na determinação do comportamento da rugosidade das superfícies. Por fim, Alsoufi e Elsayed (2017) concluíram que a direção de medição em  $90^\circ$  é a mais adequada para avaliar os efeitos da rugosidade, colaborando com as discussões apresentadas anteriormente para os resultados deste estudo.

Uma das principais motivações para a medição da rugosidade foi buscar um valor quantitativo que descrevesse a textura das faces das peças e auxiliasse na interpretação da variação do coeficiente de atrito estático. Neste sentido, verificou-se, para ambos os materiais, que quanto maior a razão entre a maior e a menor rugosidade das superfícies em contato, menor o coeficiente de atrito (Tabela 37). A “razão” entre os valores foi interpretada neste estudo como a maior ou a menor afinidade entre as superfícies.

Para a análise da razão (Tabela 37) foram selecionadas, no PLA e no PETG, as principais condições responsáveis pelos menores e maiores valores de  $\mu_e$ :  $0^\circ|90^\circ$ ,  $45^\circ|0^\circ$ ,  $45^\circ|45^\circ$  e  $90^\circ|90^\circ$ . É importante lembrar que no PETG foram identificadas igualdades estatísticas para os valores de  $\mu_e$  em  $0^\circ|0^\circ$  com  $0^\circ|90^\circ$  e em  $90^\circ|45^\circ$  e  $90^\circ|90^\circ$ . A relação entre a rugosidade da “superfície de interação” e do “bloco padrão”, com os valores médios de  $\mu_e$ , é apresentada nos gráficos das Figuras 106 e 107, respectivamente para o PLA e o PETG.

Tabela 37 – Razão entre rugosidades para o PLA e PETG.

Interação	PLA			
	Maior $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Menor $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Razão (u.a)	$\mu_e$ (u.a) (médio)
$0^\circ 90^\circ$	15,30	1,48	10	0,12
$45^\circ 45^\circ$	13,71	7,30	2	0,23
$90^\circ 90^\circ$	16,54	15,30	1,1	0,37
<b><math>0^\circ 0^\circ</math></b>	<b>1,48</b>	<b>0,45</b>	<b>3</b>	<b>0,14</b>
	PETG			
	Maior $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Menor $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Razão (u.a)	$\mu_e$ (u.a) (médio)
$45^\circ 0^\circ$	5,39	0,66	8	0,13
$0^\circ 90^\circ$	15,24	1,46	10	0,14
$45^\circ 45^\circ$	13,90	5,39	3	0,17
$90^\circ 90^\circ$	15,24	10,49	1,5	0,20
<b><math>0^\circ 0^\circ</math></b>	<b>1,46</b>	<b>0,66</b>	<b>2</b>	<b>0,14</b>

As condições com maior coeficiente de atrito estático para o PLA apresentaram razões entre as rugosidades das superfícies em torno de 1,1 e 2 vezes (Tabela 37), respectivamente

para as interações  $90^\circ|90^\circ$  <sup>43</sup> ( $\mu_e \approx 0,38$ ) e  $45^\circ|45^\circ$  ( $\mu_e \approx 0,23$ ) — letras (a) e (b) na Figura 106. Os valores permitem entender que estas condições dispõem de faces em contato com maior afinidade quando comparadas à condição de menor  $\mu_e$  ( $\approx 0,12$ ) —  $0^\circ|90^\circ$ , letra (c) na Figura 106 —, na qual se observa uma razão de aproximadamente 10 vezes (Tabela 37).

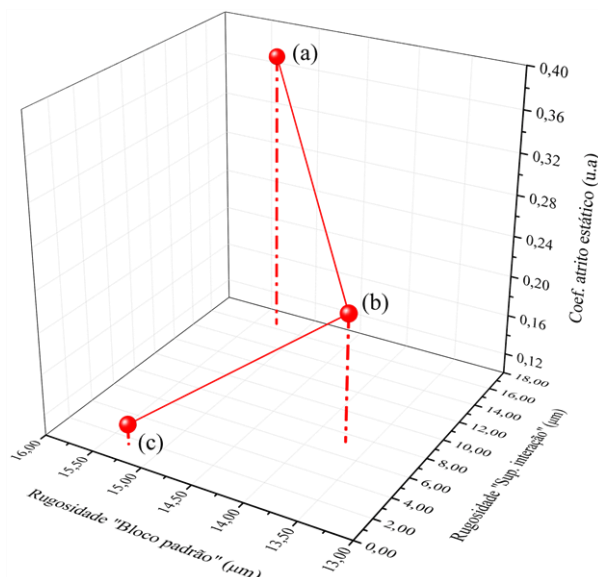


Figura 106 – Relação entre as rugosidades das superfícies em contato e o valor de  $\mu_e$ , PLA.

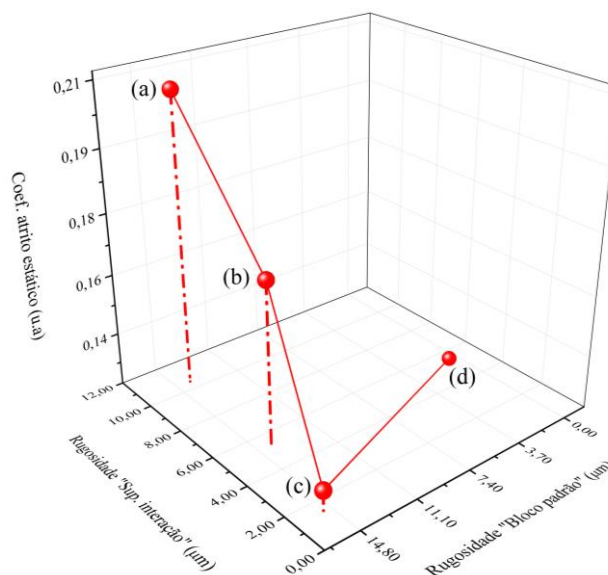


Figura 107 – Relação entre as rugosidades das superfícies em contato e o valor de  $\mu_e$ , PETG.

<sup>43</sup> Inclusive, para esta condição de interação ( $90^\circ|90^\circ$ ), verificou-se que as rugosidades das faces da “superfície de interação” e do “bloco padrão” apresentaram valores estatisticamente iguais de acordo com o método de comparação de *t-Student* (análise disponível no Apêndice A).

Relativamente ao PETG, as mesmas constatações feitas para o PLA são observadas: (i) nas condições críticas (maiores valores de  $\mu_e$ ), as razões entre as rugosidades das faces foram em torno de 1,5 e 3 vezes (Tabela 37), nesta ordem, para as interações  $90^\circ|90^\circ$ <sup>44</sup> ( $\mu_e \approx 0,20$ ) e  $45^\circ|45^\circ$  ( $\mu_e \approx 0,17$ ) — letras (a) e (b) na Figura 107; (ii) nas situações de menor coeficiente de atrito,  $0^\circ|90^\circ$  ( $\mu_e \approx 0,14$ ) e  $45^\circ|0^\circ$  ( $\mu_e \approx 0,13$ ), a razão entre as rugosidades foi aproximadamente de 10 e 8 vezes (Tabela 37), respectivamente, representando uma baixa afinidade entre as superfícies — Figura 107 (c) e (d).

A tendência de maior compatibilidade (afinidade) entre as superfícies em contato, construídas com o mesmo ângulo de varredura, pode ser entendida pelo fato de que estas configurações de interação permitem que a região convexa dos filamentos depositados (pico) se “encaixe” na região côncava (vale) entre dois elementos vizinhos — Figura 108 (a) e (d).

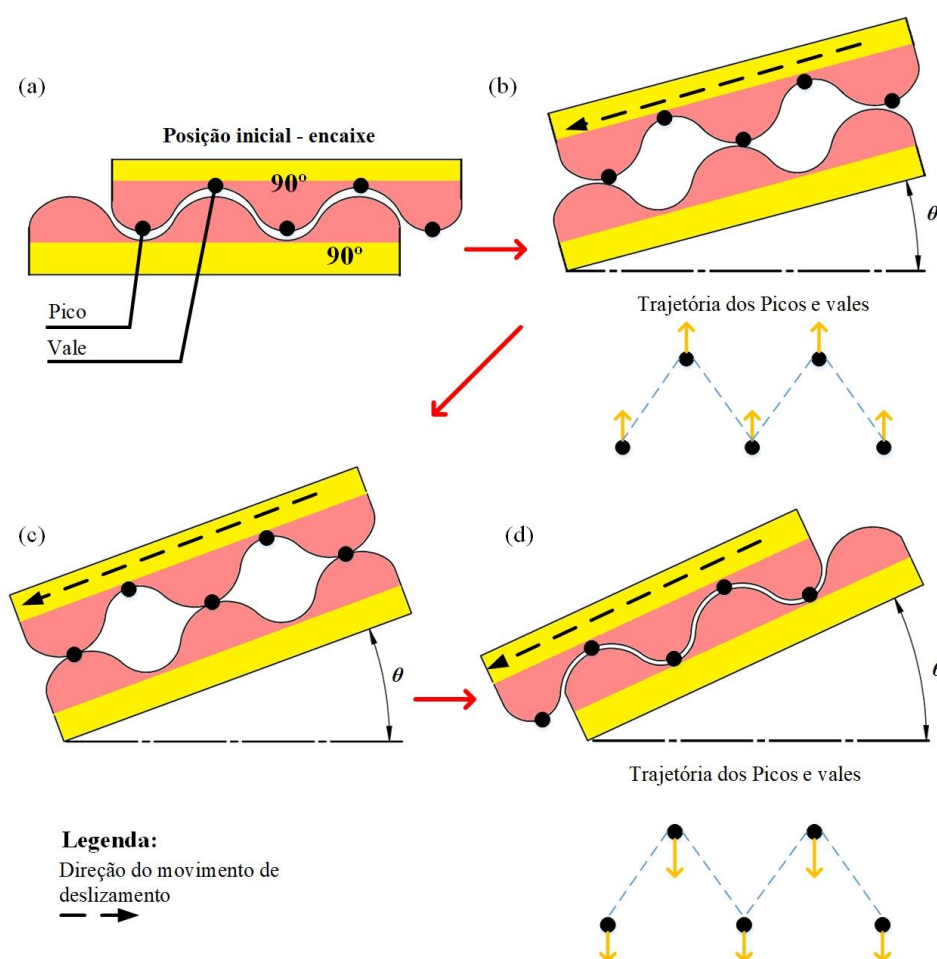


Figura 108 – Encaixe e movimento entre superfícies com filamentos em  $90^\circ$ .

<sup>44</sup> Assim como para o PLA, no PETG verificou-se que as rugosidades da “superfície de interação” ( $90^\circ$ ) e do “bloco padrão” ( $90^\circ$ ) eram estatisticamente iguais, de acordo com o teste de *t-Student* (Apêndice A).



Nas condições de interação  $45^\circ/45^\circ$  e  $90^\circ/90^\circ$ , e principalmente nesta última, este encaixe se opõe à direção de deslizamento entre as superfícies e contato no plano inclinado, fazendo com que sejam exigidos maiores ângulos de inclinação ( $\theta$ ) para que uma das peças saia do repouso (condição inicial) e inicie o movimento. As maiores inclinações são necessárias uma vez que, para que os picos e vales das peças em contato saiam da condição inicial, precisam realizar um movimento relativo com uma espécie de trajetória oscilatória — Figura 108 (b), (c) e (d) —, na qual um pico precisa se deslocar de um vale para outro vale, e assim sucessivamente. Como o coeficiente de atrito estático ( $\mu_e$ ) é equivalente à tangente do ângulo de inclinação ( $\theta$ ) (ângulo de atrito ou ângulo de repouso), quanto maior este ângulo maior o valor de  $\mu_e$ .

Especialmente em  $0^\circ/0^\circ$ , mesmo com baixas razões <sup>45</sup> entre as rugosidades das superfícies em contato — 2 e 3 vezes, respectivamente para o PETG e o PLA (Tabela 37) —, o coeficiente de atrito estático médio é menor do que o das outras condições de interação com igualdade de ângulos de superfície,  $45^\circ/45^\circ$  e  $90^\circ/90^\circ$ . Diferentemente das situações citadas anteriormente, o encaixe entre as superfícies  $0^\circ/0^\circ$  não se opõe ao movimento de deslizamento (Figura 109), o que faz com baixos ângulos de inclinação sejam necessários para sair da condição inicial de repouso, impactando em menores valores de  $\mu_e$ .

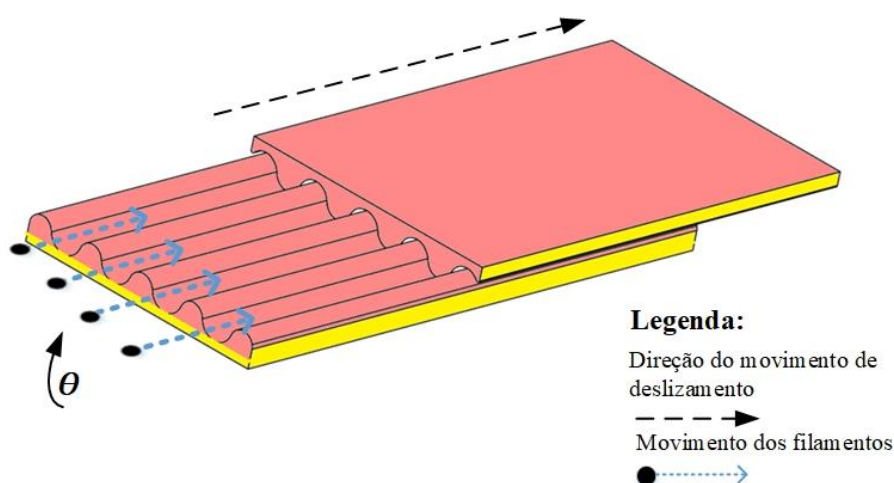


Figura 109 – Encaixe e movimento entre superfícies com filamentos em  $0^\circ$ .

Por fim, a predisposição para baixos valores de coeficiente de atrito em situações em que os ângulos de superfície das interações são diferentes, como em  $0^\circ/90^\circ$ , por exemplo, deve-se a fatores como a falta de encaixe entre as mesmas, decorrente do fato de que predominantemente

<sup>45</sup> É importante considerar para o cálculo da razão também a baixa magnitude dos valores de rugosidade para as superfícies construídas com  $0^\circ$ .

o contato entre as peças se dá nas regiões do topo dos filamentos de ambas as partes — Figura 110 (a). A configuração favorece uma boa condição de deslizamento — Figura 110 (b) — entre as superfícies em contato devido à necessidade de menores inclinações para iniciar o movimento e, conseqüentemente, reduzindo o valor de  $\mu_e$ .

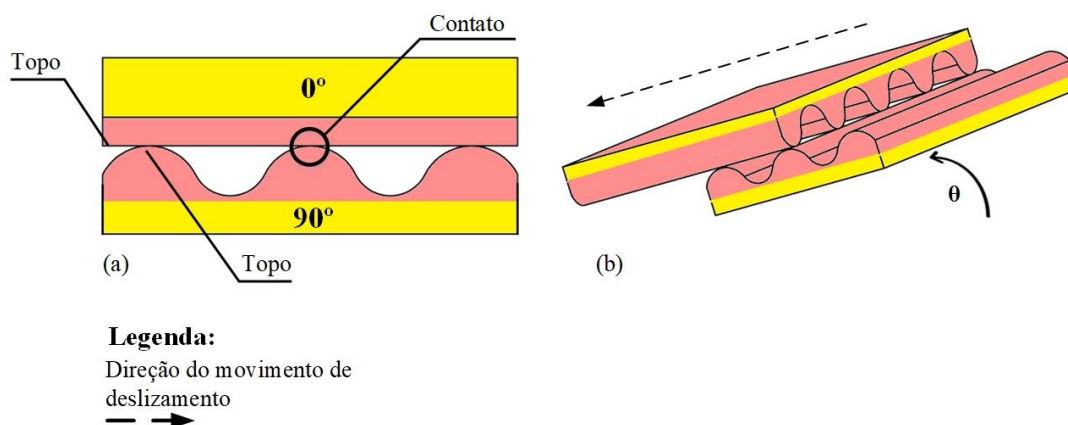


Figura 110 – Interação 0°|90°, (a) contato e (b) deslizamento.

### 3.5.4 Conclusão sobre a análise das superfícies impressas

Apesar da simplicidade do método utilizado para a medição do coeficiente de atrito estático, os valores obtidos neste estudo encontram-se próximos a outros descritos na literatura, não limitada ao contexto da Impressão 3D: (i) para o PLA o valor de  $\mu_e$  variou entre 0,12 e 0,17, desconsiderando neste momento as situações críticas para 45°|45° (0,23) e 90°|90° (0,38), próximos ao resultado apresentados por Běhálék *et al.* (2012), 0,16; (ii) no PETG a faixa de valores foi de 0,13 a 0,21 e dados fornecidos pela empresa Klöckner Pentaplast (2015) mostram um valor de coeficiente de atrito estático de 0,22. Entre as contribuições deste trabalho para o planejamento da construção dos conjuntos *snap-fit* destacam-se:

- a) o coeficiente de atrito estático é influenciado pela interação entre os ângulos de superfície das peças em contato;
- b) a relação entre as texturas (rugosidades) — que são influenciadas pelo ângulo de varredura — das superfícies em contato modifica o coeficiente de atrito estático;
- c) faces fabricadas com o mesmo ângulo de varredura, quando em contato, tendem a gerar um encaixe entre os picos (topos dos filamentos depositados) e os vales (regiões entre dois filamentos depositados). O encaixe, dependendo da direção do movimento de deslizamento entre as superfícies, pode se opor a este e gerar altos valores de  $\mu_e$ ;

- d) a maior rigidez do PLA, em comparação ao PETG, pode ter colaborado para os menores valores de coeficiente de atrito estático apresentados pelo material.

Com base nas quatro constatações acima, o usuário deve planejar a construção das peças considerando primeiramente a direção do movimento relativo entre as mesmas e, em seguida, definir os ângulos de varredura a serem configurados para a fabricação das superfícies. Estes devem preferencialmente ser diferentes entre si; caso iguais, que promovam um encaixe a favor do movimento de deslocamento. Por fim, é importante mencionar que este estudo avaliou o coeficiente de atrito em função de fatores resultantes de um processo de fabricação. No entanto, outras propriedades dos materiais, tais como afinidade química, podem ter tido alguma influência nos resultados obtidos.



## CAPÍTULO 4

# ANÁLISE DAS CONEXÕES *SNAP-FIT*

---

### 4.1 PARTE 1: MÓDULO DE BAIXO COEF. ATRITO

A primeira etapa de avaliação das conexões *snap-fit* consistiu na medição da força de inserção em uma condição de baixo coeficiente de atrito. Para tal, foi usinado um módulo de teste (Figura 111), equivalente à parte fêmea do conjunto *snap-fit*, em Poliacetal<sup>46</sup> — Polioximetileno (POM) —, no qual os ensaios de montagem com o elemento macho obtido por Impressão 3D foram realizados. O procedimento foi efetuado com o objetivo de potencializar a análise dos efeitos da força de deflexão — cuja força de inserção é função — sobre a barra *cantilever* impressa, em uma condição de interação de superfícies e esforços cíclicos.

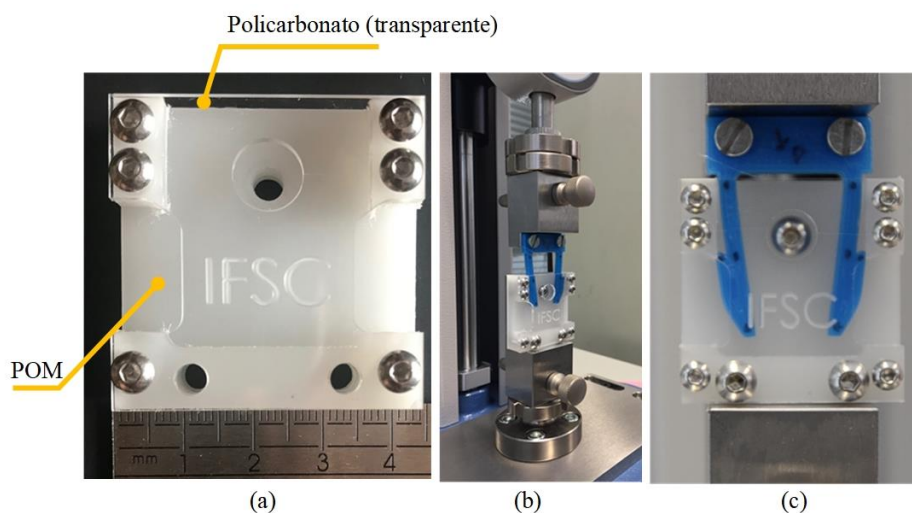


Figura 111 – Módulo de teste (a), montagem na máquina de ensaios (b) e teste de montagem (c).

O conceito geométrico dos elementos avaliados neste estudo, macho e módulo de teste (fêmea), foi inspirado nos *snap-fits* tipo *buckle*<sup>47</sup> e as principais dimensões das peças encontram-se representadas na Figura 112 — (a) macho, (b) fêmea e (c) folgas para o encaixe

<sup>46</sup> Caracteriza-se por ser um material com baixo coeficiente de atrito, resistente ao desgaste e com capacidade de auto lubrificação (DUPONT, 2015; JARVIS, 2017; MURO FRAGUAS *et al.*, 2018).

<sup>47</sup> O modelo foi escolhido pois se trata de um tipo de sistema *snap-fit* comum em aplicações cotidianas, como fechos de mochila, por exemplo, aproximando a amostra utilizada nesta tese a um componente para aplicações finais.

entre as partes. Em relação ao processo de fabricação dos machos, a configuração de Impressão 3D — Figura 113 (a) e (b) — utilizada consistiu basicamente em combinar o uso de uma orientação de construção “no plano” com uma estratégia de deposição do tipo concêntrica e um percentual de preenchimento de 100%.

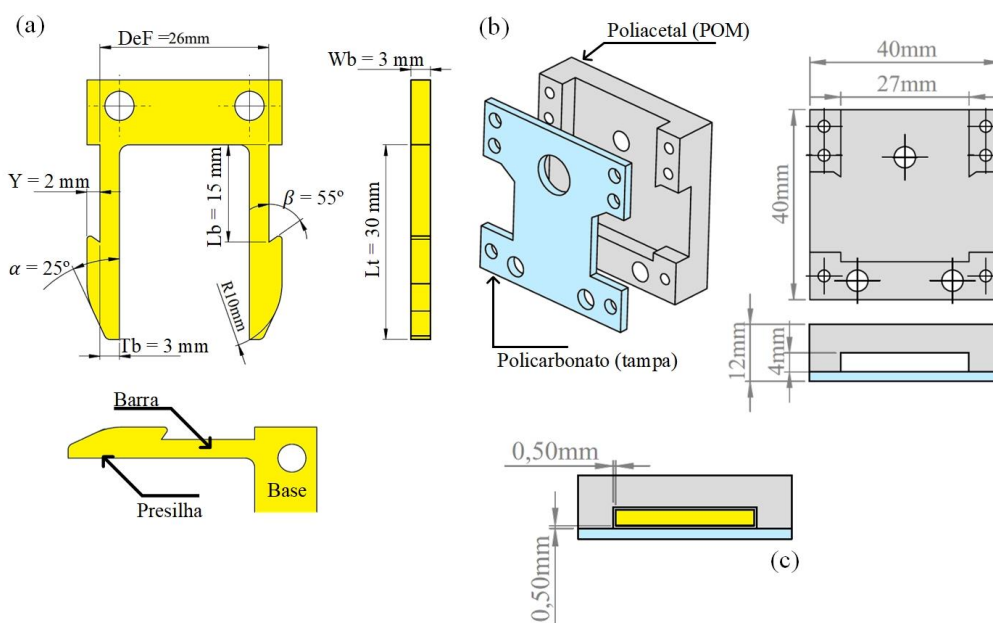


Figura 112 – Dimensões dos elementos macho (a) e módulo de teste (fêmea) (b) e folgas para o encaixe (c)<sup>48</sup>.

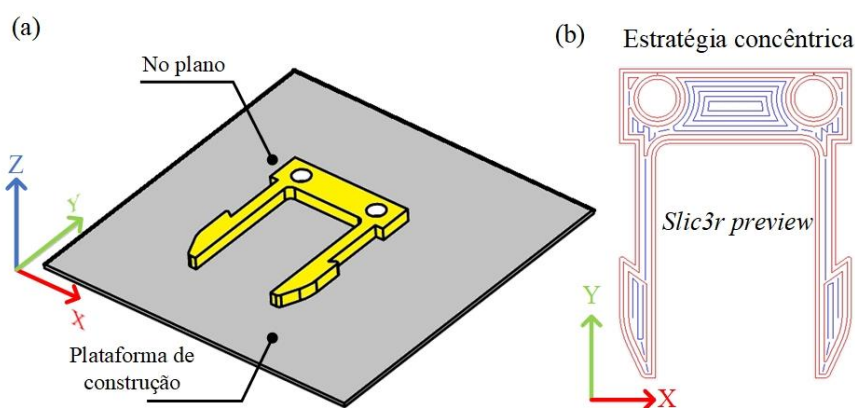


Figura 113 – Representação dos parâmetros de processo: (a) orientação de construção e (b) estratégia concêntrica.

<sup>48</sup> DeF (distância entre as faces externas das barras); Y (profundidade do rebaixo); Tb (espessura da barra); Wb (largura da barra); Lt (comprimento total); Lb (comprimento da barra);  $\alpha$  (ângulo da face de inserção);  $\beta$  (ângulo da face de retenção). Com exceção da sigla “DeF”, as demais foram padronizadas de acordo com Bonenberger (2005).

A composição paramétrica, aplicada na fabricação dos machos, teve como objetivo garantir o máximo de filamentos depositados unidirecionalmente dentro e entre camadas, e assim possibilitar que as cargas de deflexão (decorrentes do processo de inserção) fossem majoritariamente distribuídas sobre os filamentos depositados e não sobre as linhas de adesão (região de baixa resistência mecânica) entre estes — Figura 114 (a) e (b). É importante destacar que a parametrização utilizada resulta dos estudos preliminares, em especial do padrão construtivo que gerou as melhores propriedades mecânicas aos elementos impressos (seção 3.4). Um resumo dos parâmetros configuráveis e seus ajustes neste estudo encontram-se disponíveis na Tabela 38.

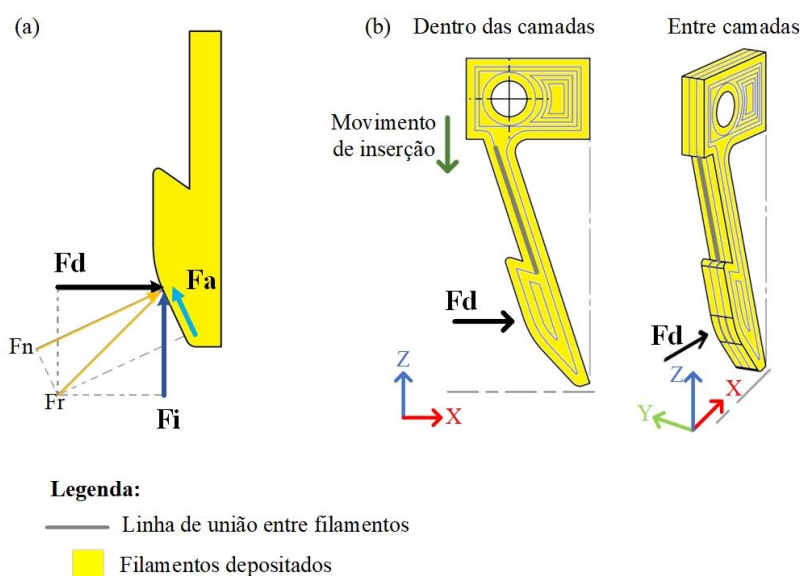


Figura 114 – Diagrama de forças (a) e disposição dos filamentos depositados em relação às cargas na inserção (b)<sup>49</sup>.

Tabela 38 – Parâmetros de impressão e seus ajustes.

Parâmetro	Ajuste
Espessura de camada (mm)	0,2
Número de perímetros (u.a)	3
Percentual de preenchimento (%)	100
Multiplicador de extrusão (u.a)	0,9
Estratégia de deposição (u.a)	Concêntrica
Orientação de construção (u.a)	No plano
Velocidade de preenchimento (mm/s)	40
Velocidade da primeira camada (mm/s)	15

Continua

<sup>49</sup> Relativamente às abreviações da Figura 114 (a) e (b): força de inserção ( $F_i$ ), força de deflexão ( $F_d$ ), força de atrito ( $F_a$ ), força normal ( $F_n$ ) e força resultante ( $F_r$ ) (ERHARD, 2006). É importante mencionar que os sistemas de referência da Figura 114 (b) estão relacionados ao movimento de inserção.

Tabela 38 – Parâmetros de impressão e seus ajustes (Continuação).

Velocidade dos perímetros (mm/s)	20
Temperatura de extrusão (°C)	215 (PLA) e 235 (PETG)
Temperatura da base (°C)	70

Para ambos os materiais investigados neste trabalho, PLA e PETG, foi fabricado um conjunto de cinco machos. Cada uma das peças foi confeccionada individualmente para garantir uma mesma condição de temperatura e nivelamento da plataforma de construção da impressora 3D (*Prusa I3 Hephastos*). Três elementos de cada grupo de peças foram avaliados em um “teste de montagem completa” (MC) e dois em um ensaio de “quase montagem” (QM). Em ambos os testes, a força de inserção foi medida com o auxílio de um dinamômetro com célula de carga de 2,5kN (resolução de 0,5N), acoplado a uma bancada de testes (coluna de deslocamento) *MultiTest 2.5 – dv (Mecmesin)* (resolução de deslocamento de 0,001 mm). Os ensaios mencionados são descritos a seguir:

- a) “teste de montagem completa” (MC) — Figura 115 (a): consistiu na medição da força de inserção até o encaixe total entre os elementos da conexão *snap-fit*. O macho foi deslocado ao longo da zona de inserção da fêmea com velocidade de 50mm/min. Para cada uma das peças, foram executadas dez repetições de montagem/desmontagem, com o objetivo de verificar se a grandeza em análise apresentaria quedas em sua magnitude devido à aplicação de esforços cíclicos. A desmontagem das conexões, ao final de cada ciclo de montagem, foi realizada aplicando uma carga manual (pelo operador) para defletir as barras *cantilever*, associada a um deslocamento controlado do eixo de movimentação da máquina de ensaios. Este procedimento foi adotado para que não houvesse avarias nas amostras (como, por exemplo, a quebra da presilha do elemento macho) decorrente de esforços de tração (aos quais as peças estariam sujeitas em um processo de desmontagem automático, isto é, sem a intervenção do operador para defletir as barras) e que, por consequência, impedissem a execução dos ciclos de montagem;
- b) “quase montagem” (QM) — Figura 115 (b): a força de inserção foi avaliada aplicando um deslocamento ao elemento macho até um ponto máximo antes da ocorrência do encaixe completo entre as partes. O procedimento foi realizado de forma automática por 100 ciclos, que compreenderam movimentos de inserção e remoção. Das duas amostras selecionadas, uma foi testada com velocidade de 50 mm/min e a outra com 100 mm/min. Como o teste não envolveu montagem completa, nenhuma ação de desmontagem por parte do operador foi necessária, e portanto, permitiu avaliar o



comportamento dos *snap-fits* sem a influência de cargas manuais (não controláveis, isto é, forças variáveis).

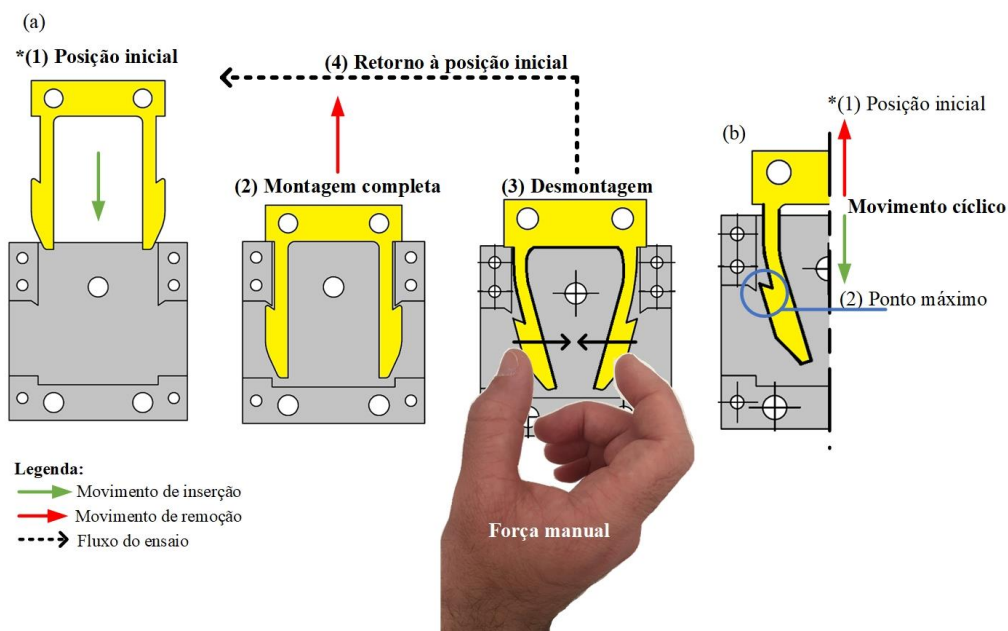


Figura 115 – Etapas do “teste de montagem completa” (a) e “teste de quase montagem” (b).

Além dos ensaios mecânicos, um conjunto de quatro amostras (machos impressos) foi submetido à Tomografia Computadorizada (TC) com o objetivo de avaliar as dimensões, a forma, a integridade dos filamentos entre e dentro das camadas e o percentual de vazios de cada uma das peças. Os elementos foram selecionados de modo a incluir na análise duas amostras em PLA e duas em PETG, sendo, para cada material, uma peça correspondente ao teste de montagem completa e outra do de quase montagem. As análises de TC foram realizadas na empresa NM3D Ibérica (Vila Nova de Cerveira), com o auxílio de um tomógrafo Nikon modelo XT H 225. As aferições foram efetuadas com uma resolução de medição de 50  $\mu\text{m}$ .

Para amparar as discussões dos resultados da análise de tomografia e dos próprios ensaios de medição de força, as peças foram avaliadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em um equipamento Quanta 400 FEG ESEM/EDAX Genesis X4M, localizado no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP). As amostras examinadas foram revestidas com ouro/paládio (Au/Pd), através de pulverização catódica, em um dispositivo SPI *Module Sputter Coater*. Na Figura 116 (a) e (b) são representadas (em cinza) as regiões observadas nas peças.

Uma fratura foi gerada para permitir a análise da estrutura interna das peças, Figura 116 (b). Para tal, foi realizado um entalhe na superfície do topo das amostras, Figura 116 (a),

próximo à região do encastramento. Em seguida os machos foram congelados em nitrogênio líquido e com um esforço manual as peças foram quebradas.

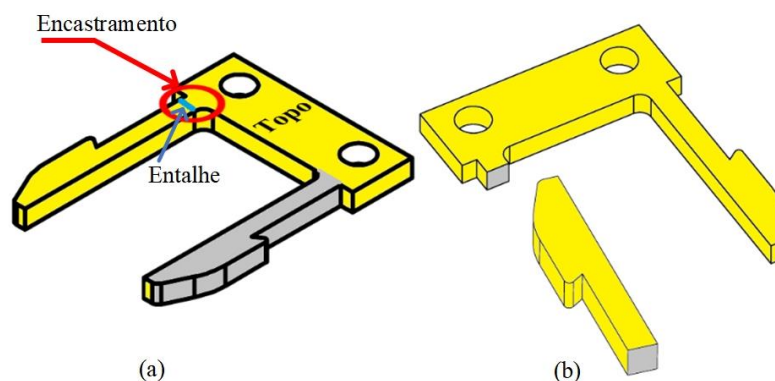


Figura 116 – Regiões analisadas no MEV: (a) externas e (b) internas.

#### 4.1.1 Resultados e discussões

Para um melhor entendimento e organização, a apresentação dos resultados deste estudo foi dividida em duas etapas: ensaios de medição da força de inserção e análises de tomografia.

##### 4.1.1.1 Medição da força de inserção

Os valores médios da força de inserção, obtidos no “teste de montagem completa”, para as três amostras em PLA e PETG encontram-se disponíveis na Tabela 39. O comportamento da força de inserção ao longo dos sucessivos ciclos de montagem, para cada um dos machos, nos dois materiais avaliados, é apresentado também na Figura 117 (a) (PLA) e (b) (PETG).

Tabela 39 – Valores médios da força de inserção por ciclos de montagem, PLA e PETG.

Ciclos de montagem	Força de inserção média (N)	
	PLA	PETG
1	12,83 ± 0,58	8,17 ± 0,58
2	11,00 ± 0,00	6,83 ± 0,76
3	10,33 ± 0,29	6,83 ± 0,76
4	10,17 ± 0,29	6,83 ± 0,76
5	9,83 ± 0,29	6,67 ± 0,76
6	9,67 ± 0,29	6,17 ± 0,58
7	9,33 ± 0,29	6,00 ± 0,87
8	9,33 ± 0,29	6,00 ± 0,87
9	9,17 ± 0,29	6,00 ± 0,87
10	9,17 ± 0,29	6,00 ± 0,87
<b>Média geral</b>	<b>10,08 ± 1,12</b>	<b>6,55 ± 0,92</b>

Considerando a força de inserção média (Tabela 39) no primeiro ciclo de montagem, uma vez que foram os maiores observados, o PLA apresentou resultados (12,83N) aproximadamente 1,6 vez (+ 57%) maior que o PETG (8,17N). O efeito está relacionado à menor capacidade de deformação e à maior rigidez do PLA quando comparado ao PETG, conforme verificado no estudo de caracterização dos materiais da seção 3.4. Tais características, portanto, fazem com que maiores forças sejam necessárias para gerar, neste caso, uma mesma deflexão nas peças produzidas em PLA. Destaca-se também que a razão entre os valores de força de inserção (1,6) é muito próxima à razão entre o módulo de *Young* (2,0) dos materiais obtidos na configuração de impressão unidirecional, a mesma utilizada para a confecção dos elementos machos.

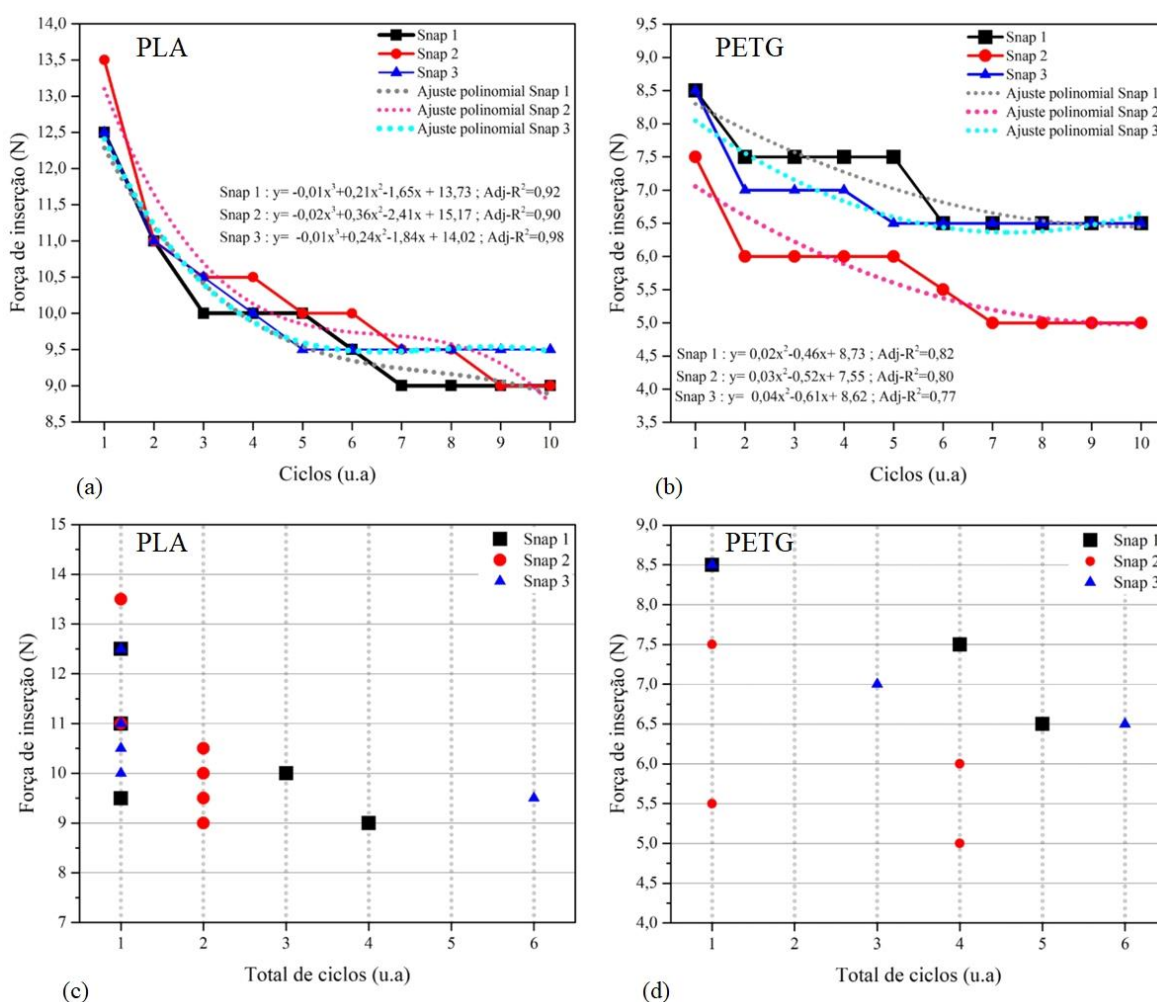


Figura 117 – Força de inserção ao longo dos ciclos de montagem, (a) PLA e (b) PETG, e distribuição da força por número de ciclos, (c) PLA e (d) PETG.

Em seguimento à análise do valor máximo da força de inserção, nos gráficos da Figura 117 (a) e (b) é possível avaliar o rendimento das três peças por material ao longo dos dez ciclos

de montagem e as principais características semelhantes entre os componentes em PLA e PETG após a conclusão dos ensaios:

- a) em ambos os materiais, os três machos apresentaram quedas na força de inserção do primeiro para o último ciclo de montagem. No PETG, a redução total da força de montagem foi em torno de -23,5% (2,0N) para as peças 1 e 3, e -33,3% (2,5N) para o componente 2. Para o PLA, a diminuição da magnitude da força variou aproximadamente -28,0% (3,5N) na amostra 1, -33,3% (4,5N) em 2, e -24,0% (3,0N) na peça 3;
- b) proporcionalmente aos valores máximos e mínimos da força de inserção, as peças nos diferentes materiais exibiram um comportamento de queda da força (redução percentual) semelhante no contexto global analisado;
- c) uma tendência de queda acentuada da força de inserção é observada do primeiro para o segundo ciclo de montagem. Tal reação pode estar relacionada ao fato de que as camadas que compõem as peças encontram-se na sua integridade original após a fabricação e, portanto, oferecem maior resistência às deflexões aplicadas, aumentando o valor da força de montagem e assim sujeitando os machos a algum tipo de avaria por esforços mecânicos;
- d) outra característica comum entre os *snap*s machos em PLA e PETG é que a relação entre a queda da força de montagem e o número de ciclos de encaixe não segue uma tendência linear.

As principais diferenças entre os materiais, e por consequência entre os machos fabricados por eles, foram identificadas a partir da análise da força de inserção ciclo a ciclo, do ensaio de montagem completa — para um melhor entendimento das discussões, foram construídos gráficos auxiliares, Figura 117 (c) (PLA) e (d) (PETG), os quais relacionam o total de ciclos para qual um determinado valor da força de montagem se manteve estável — e dos resultados do “teste de quase montagem” — Figura 118 (a) (PLA) e (b) (PETG).

Com base na análise entre ciclos do ensaio de montagem completa dos machos em PLA, é possível observar quedas sequenciais da força de inserção nos primeiros ciclos de montagem, o que é retratado pela maior concentração de pontos de força relacionados ao total de ciclos entre 1 e 2 no gráfico da Figura 117 (c). Uma estabilização da força de montagem é verificada nos últimos ciclos de encaixe, conforme observado nas peças 1 e 3, nas quais os valores de força se mantêm, sem variação, entre 4 e 6 ciclos. O comportamento, no entanto, não indica a manutenção de um valor constante de força para números de ciclos de inserção acima de dez,

o que é comprovado com as respostas do “teste de quase montagem” — Figura 118 (a)<sup>50</sup>. Em ambas as velocidades testadas, (50 e 100) mm/min, a força máxima durante a inserção dos machos em PLA continuou sofrendo reduções gradativas até o centésimo ciclo avaliado.

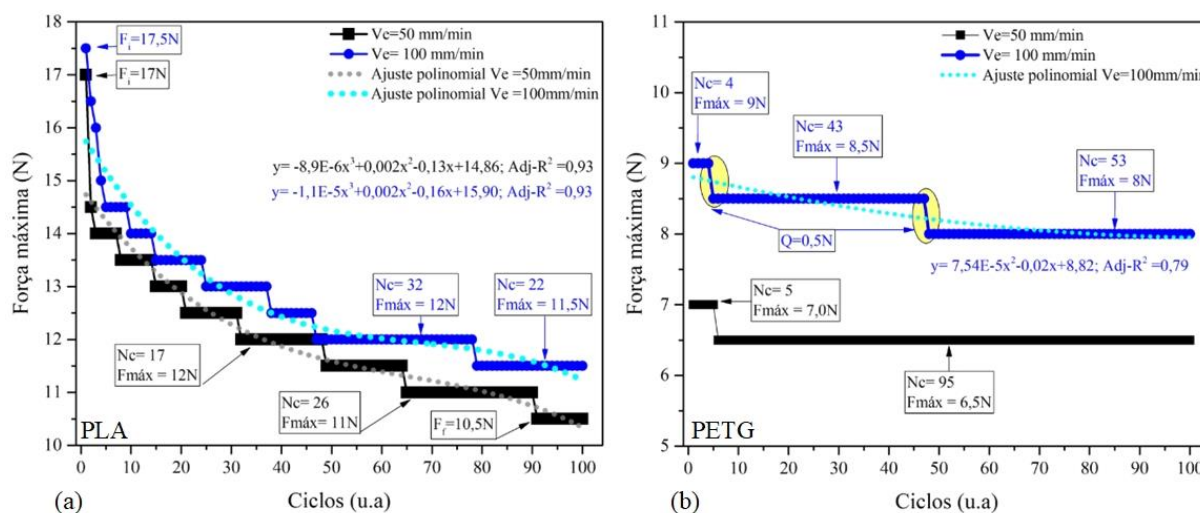


Figura 118 – Teste de quase montagem, (a) PLA e (b) PETG.

No total, as quedas na força máxima, por ciclo, nas peças analisadas no “teste de quase montagem” foram de aproximadamente -34,3% (6,0N) e -38,2% (6,5N), respectivamente, para os machos ensaiados com 100 e 50 mm/min. Independentemente dos valores identificados no início e no fim dos testes, as razões entre estes, 1,6 em 50 mm/min e 1,5 em 100 mm/min, no experimento de quase montagem são próximas às encontradas no ensaio de montagem completa — entre 1,3 e 1,5. A proximidade entre as razões indica que a força de desmontagem manual pode ter acelerado o processo de redução total da força de inserção no contexto da montagem completa, isto é, com dez ciclos frente aos 100 no processo de quase montagem.

Além da interferência manual, a própria mesoestrutura das peças impressas, associada às características mecânicas do material, pode ter influenciado nas situações observadas. Fisicamente, os machos impressos são constituídos por um conjunto de filamentos conectados, dentro e entre camadas e, portanto, existe a possibilidade de que uma dessas estruturas, ou um grupo delas, sofra uma falha (fissuras, rompimentos nas linhas de união entre filamentos, entre outras), ou uma deformação permanente do polímero, fazendo assim com que os componentes se oponham menos a novos esforços de montagem, reduzindo a força de inserção.

<sup>50</sup> Na Figura 118: força inicial ( $F_i$ ), força máxima ( $F_{máx}$ ), número de ciclos ( $N_c$ ), queda ( $Q$ ).

O cenário descrito tende a ser mais acentuado no PLA, uma vez que, conforme mencionado anteriormente, trata-se de material mais rígido e com baixa capacidade de deformação, apresentando ainda predisposição à fragilidade (GÁRCIA-CAMPOS *et al.*, 2018; BUYS *et al.*, 2018). Tronvoll *et al.* (2018) destacam ainda que as baixas propriedades de alongamento do PLA tornam o material pouco adequado para componentes como molas, ou semelhantes como os *snap-fits*.

Menores valores de força de inserção, no entanto, permitem que as camadas das peças, ainda preservadas, possam suportar elasticamente as deformações às quais são submetidas. O efeito pode justificar os estágios de estabilização da força, observados nos testes de montagem completa e quase montagem, realizados nas peças em PLA.

Nos testes de montagem completa com os machos em PETG é possível verificar que a força de inserção estabiliza em patamares, tanto nos primeiros (geralmente entre o segundo e o quinto) como nos últimos (entre o sexto e o décimo) ciclos de montagem — Figura 117 (b) —, haja vista a maior concentração de pontos de força associados a um total de ciclos entre 3 e 6 no gráfico da Figura 117 (d).

A maior capacidade das peças fabricadas neste material em resistir a esforços cíclicos é confirmada através dos resultados obtidos no ensaio de quase montagem. Como pode ser visto nos gráficos da Figura 118 (b), a força máxima na inserção manteve-se constante entre 8,5N e 8N por 43 e 53 ciclos, respectivamente, no teste realizado com velocidade de 100 mm/min. Na condição de ensaio com velocidade de 50 mm/min os resultados foram melhores, uma vez que a força se estabilizou em 6,5N entre o sexto e o centésimo ciclo de inserção (total de 95 ciclos). No PLA, por exemplo, os maiores patamares de estabilização da força observados foram por 32 (para  $V_e = 100$  mm/min) e 26 (para  $V_e = 50$  mm/min) ciclos — Figura 118 (a).

Os resultados do teste de quase montagem com os machos em PETG mostram ainda uma queda total da força máxima na inserção de aproximadamente -7,14% e -11,11%, nesta ordem, para as condições de ensaio com 50 mm/min e 100 mm/min. As variações gerais identificadas no teste são menores do que as encontradas no experimento de montagem completa, o que pode estar relacionado ao fato de não ter havido interferência do operador na desmontagem.

No todo, o melhor desempenho observado nas peças fabricadas com PETG é decorrente da maior flexibilidade do material — que garante aos componentes maior capacidade de recuperação elástica —, quando comparado ao PLA. Entretanto, as sucintas variações da força de inserção entre patamares podem estar relacionadas a mecanismos de falhas estruturais ou do próprio material, conforme mencionado nas discussões anteriores.

Visualmente, não foram identificados danos estruturais nas peças em PLA e PETG, tais como fraturas ou efeitos de delaminação das camadas. Inclusive, a manutenção da integridade da união entre os filamentos no sentido do empilhamento das camadas foi constatada também através da análise de microscopia por varredura das superfícies externas das peças, Figura 119 (a) e (b).

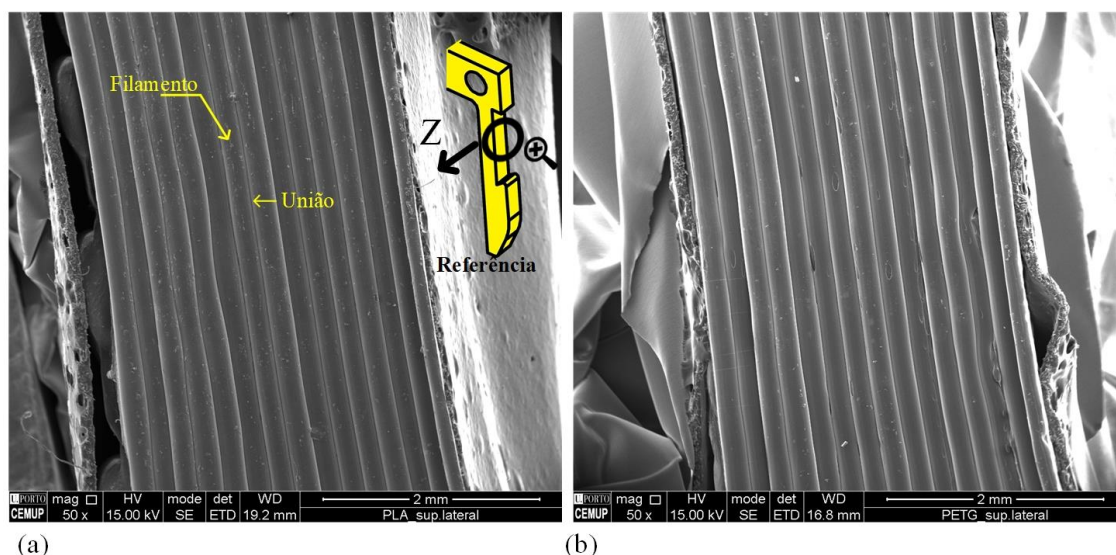


Figura 119 – Análise da superfície externa das peças em PLA (MC) (a) e PETG (MC) (b)<sup>51</sup>.

Defeitos na linha de adesão entre filamentos depositados ao longo do eixo Z, Figura 120 (a), foram identificados no macho em PETG analisado por MEV. Entretanto, não se caracterizam por falhas geradas por esforços mecânicos, mas sim por instabilidades no processo de deposição. O perfil das avarias, e a ocorrência das mesmas no corpo dos filamentos depositados — Figura 120 (b) —, indica que as variações no fluxo do extrudado podem ter sido geradas pela presença de bolhas no material não processado que, ao entrarem em contato com a extremidade quente do cabeçote de impressão, rebentam, causando assim os defeitos observados.

A análise das superfícies externas por microscopia evidenciou a formação de estrias nos filamentos entre camadas da peça em PLA avaliada, na região do encastramento (zona de maior concentração de esforços) — Figura 121 (a). Possivelmente os defeitos foram decorrentes de deformações plásticas nos filamentos, resultantes dos esforços criados durante os movimentos cíclicos de deflexão no encaixe e remoção dos machos — Figura 121 (b). No macho em PETG,

<sup>51</sup> A imagem do macho em amarelo consiste em uma referência do local avaliado na microscopia e consta em todas as seguintes figuras resultantes desta análise.



por sua vez, não foi identificado tal defeito, o que está relacionado ao comportamento flexível do material e, portanto, à melhor capacidade de suportar deformações sequenciais.

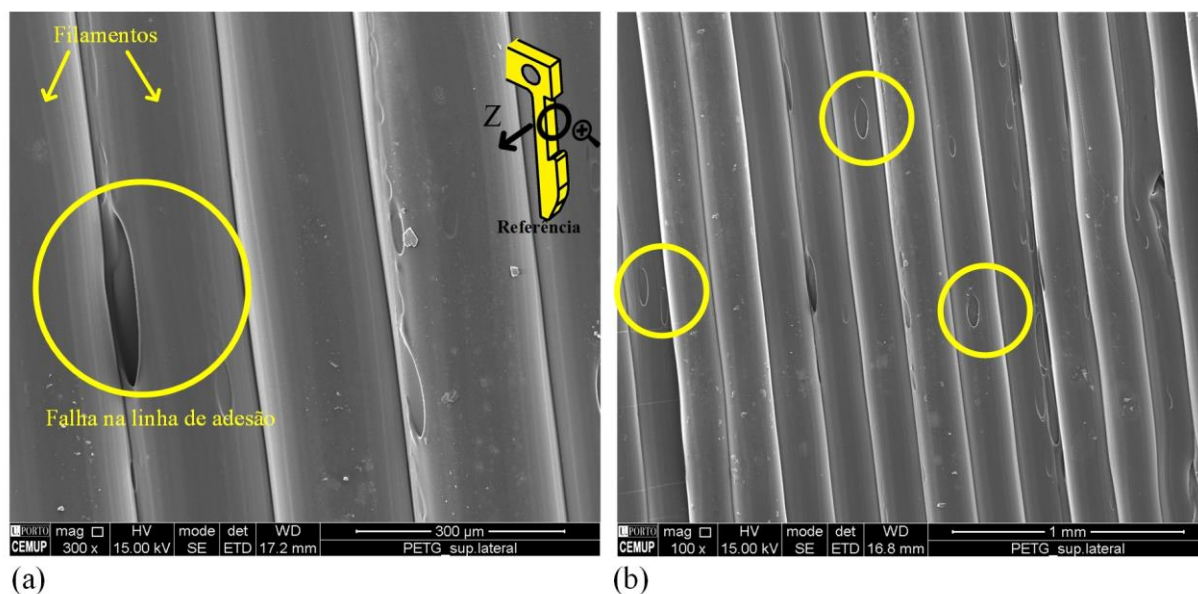


Figura 120 – Falhas na linha de adesão (a) e no corpo dos filamentos depositados (b), amostra em PETG (MC).

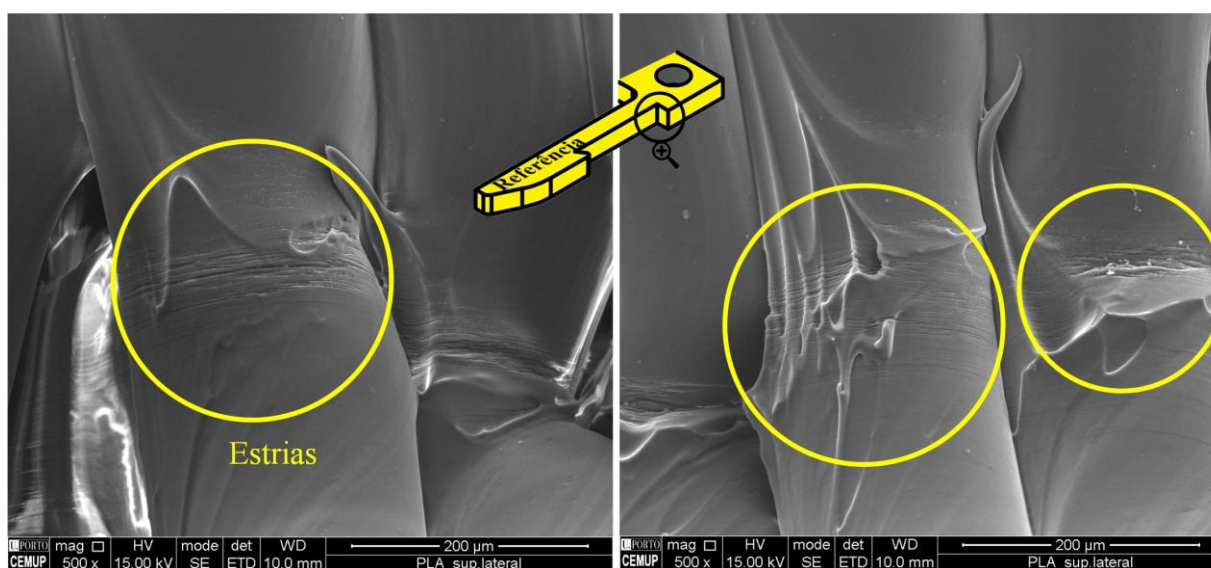


Figura 121 – Estrias nos filamentos na zona do encastramento, amostra PLA (MC).

#### 4.1.1.2 Tomografia computadorizada (TC)

A análise de tomografia, inicialmente, foi utilizada para avaliar o percentual total de vazios no interior das peças impressas. Os machos em PLA apresentaram porcentagens de vazios de 3,8% e 4,2%, respectivamente, para as amostras avaliadas nos testes de montagem



completa (MC) e quase montagem (QM). Nos componentes em PETG as taxas foram de 4,6% para a peça ensaiada na condição MC e de 3,3% no elemento testado em QM. Uma análise visual dos vazios, bem como do volume destes, é apresentada nas Figuras 122 e 123, para ambos os materiais e condições de ensaio (MC e QC).

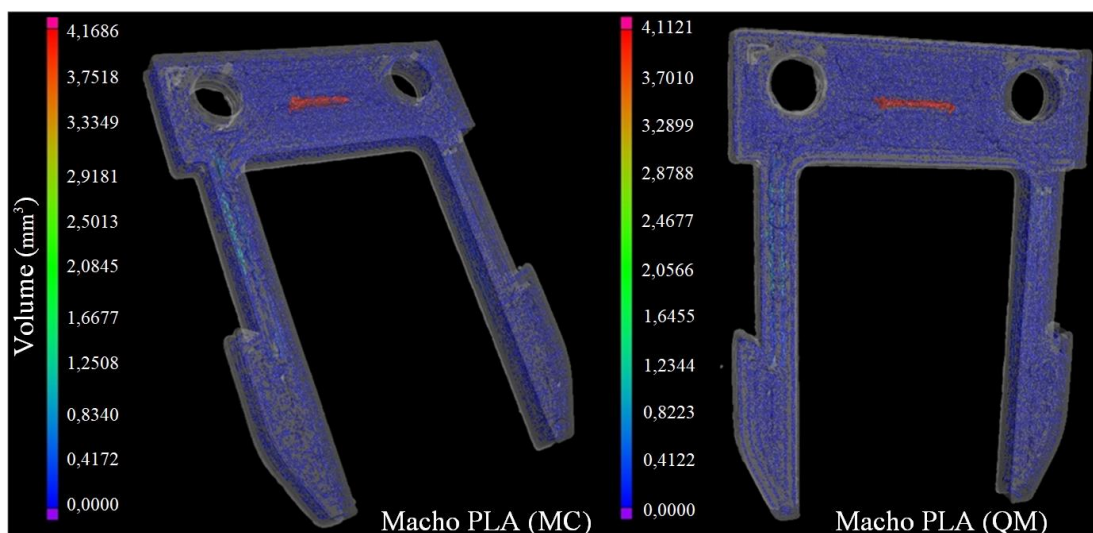


Figura 122 – Representação dos vazios e seus volumes, peças em PLA.

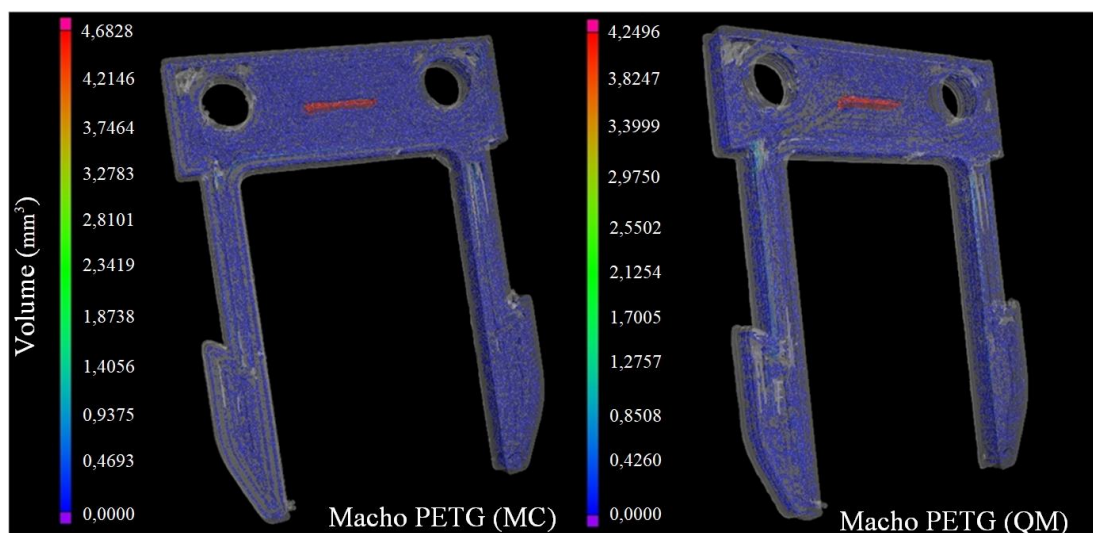


Figura 123 – Representação dos vazios e seus volumes, peças em PETG.

Conforme observado nas Figuras 122 e 123, há uma predominância de vazios com valores de volume localizados na região em azul da escala cromática, inclusive, sendo estes valores muito próximos nas quatro peças, independentemente da condição de ensaio ou do material com as quais foram fabricadas. O aspecto identificado indica uma tendência de homogeneidade

da mesoestrutura e, portanto, de repetibilidade do sistema, isto é, processo e máquina. Além do volume, a análise geral do diâmetro dos vazios de todas as peças analisadas por TC também colabora com a evidência de uniformidade da estrutura interna, uma vez que a maior parte dos espaços apresentou medidas em torno de (0,2 a 1,12) mm.

Embora não se pretenda aprofundar a discussão a seguir, cabe descrever brevemente outra métrica obtida na análise de tomografia, a esfericidade dos vazios<sup>52</sup>. A esfericidade descreve o quanto a forma de um poro se aproxima de uma esfera verdadeira, e pode ser calculada com base na área da superfície e no volume dos vazios; seus valores variam de 0 a 1, sendo 1 o equivalente a uma esfera perfeita (DU PLESSIS *et al.*, 2016; CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2018; KONG *et al.*, 2018). Kong *et al.* (2018) apresentam, de acordo com a classificação de formas de Zingg para partícula de sedimentos (ZINGG, 1935; SCHMITT *et al.*, 2016), três grupos para definir os vazios (poros) com diferentes esfericidades: (i) esféricos ( $> 0,8$ ), (ii) disco ou bastão (0,5 a 0,8) e (iii) lâminas ( $< 0,5$ ).

No presente estudo, a esfericidade dos vazios, dentro do intervalo de diâmetros de maior incidência — (0,2 a 1,12) mm —, variou entre 0,3 e 0,75, sendo identificada uma relação na qual a esfericidade aumentou conforme o diâmetro dos vazios diminuiu. No âmbito da Impressão 3D, por exemplo, Lasagni *et al.* (2016) identificaram em seu estudo valores de esfericidade, para peças produzidas por SLM (*Selective Laser Melting*), em torno de 0,5, dentro do intervalo identificado nesta investigação.

Os vazios encontrados nas peças avaliadas neste estudo foram classificados em estruturas naturais do processo de Impressão 3D por extrusão e em elementos introduzidos. Estes últimos podem ter três origens: (i) falhas de deposição/acomodação dos filamentos, (ii) danos causados pelos esforços mecânicos nos testes de montagem completa e quase montagem, (iii) ou por erros nas trajetórias e estratégias de impressão. Para esta divisão, a análise do diâmetro dos vazios foi de fundamental importância. Os elementos com dimensões dentro do intervalo de maior ocorrência, isto é, diâmetro entre (0,2 e 1,12) mm, foram considerados naturais, enquanto valores superiores a estes, falhas. Estas, por sua vez, podem ter sido as causas para a variação da força de inserção dos machos em PLA e PETG, consoante o número de ciclos de testes em MC e QM. Os maiores valores de diâmetro associados aos vazios — ou, neste caso, às falhas —, são apresentados na Figura 124 (a) e (b), respectivamente, para as peças em PLA e em PETG.

---

<sup>52</sup> Os resultados da análise do diâmetro e da esfericidade dos vazios encontram-se disponíveis no Apêndice B.

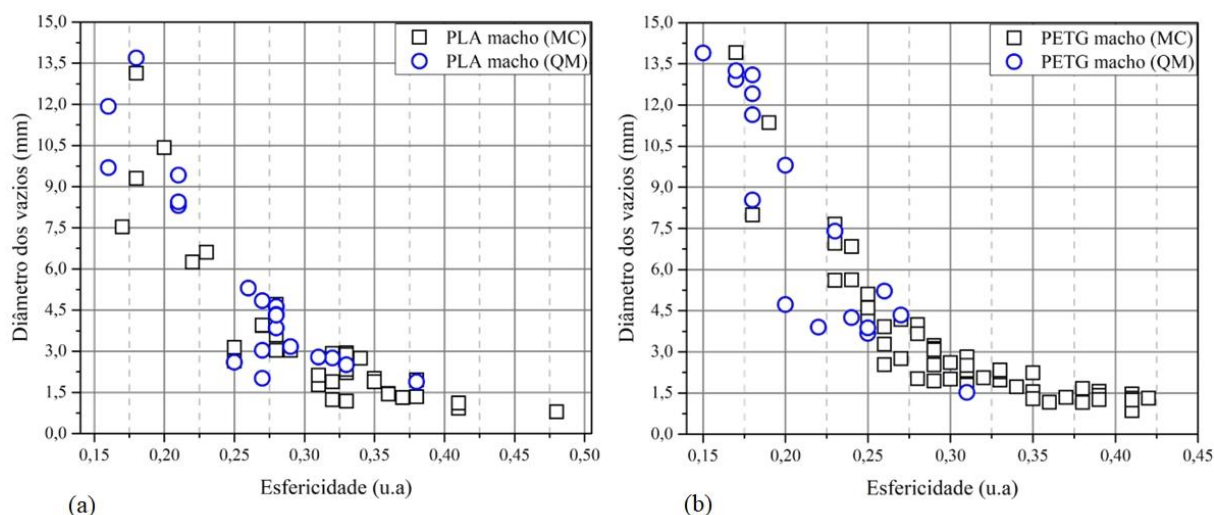


Figura 124 – Vazios de maior diâmetro: (a) PLA e (b) PETG.

A partir do diâmetro dos vazios — Figura 124 (a) e (b) — e com o auxílio das imagens de tomografia, foram identificadas falhas com origem na deposição de material nas peças em PLA e PETG, apresentadas, respectivamente, na Figura 125 (a) e (b). O padrão de falha foi encontrado em todas as peças avaliadas em TC; no entanto, selecionou-se para a discussão a amostra em PLA submetida ao teste de QM ( $D_v \approx 11,92$  mm;  $V_v \approx 1,00$  mm<sup>3</sup>;  $Es = 0,16$ )<sup>53</sup> e a em PETG avaliada no ensaio de montagem completa ( $D_v \approx 6,96$  mm;  $V_v \approx 0,12$  mm<sup>3</sup>;  $Es = 0,23$ ), por serem as que apresentaram as maiores dimensões.

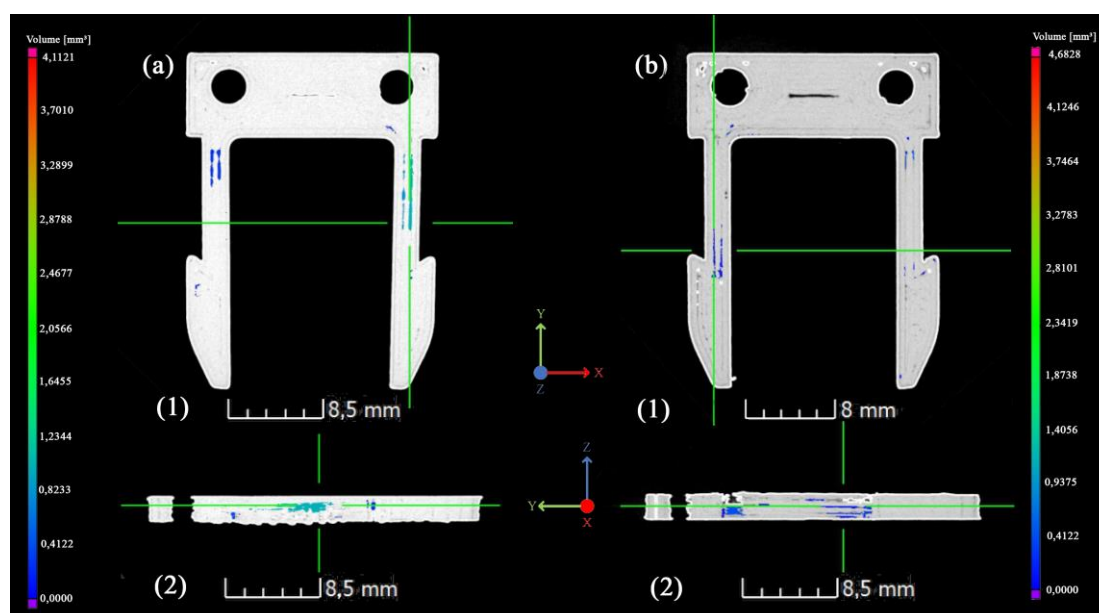


Figura 125 – Falhas de deposição/acomodação dos filamentos: (a) PLA (QM) e (b) PETG (MC).

<sup>53</sup> Diâmetro do vazio ( $D_v$ ), volume do vazio ( $V_v$ ), esfericidade ( $Es$ ).

Conforme observado na Figura 125 (a) e (b) (1), é possível verificar regiões em que os filamentos apresentam apenas conexões pontuais entre si (no sentido lateral), isto é, com a presença de lacunas entre eles. Uma vez que as peças foram fabricadas com 100% de preenchimento, estes espaços vazios entre dois filamentos na mesma camada não deveriam existir. Du Plessis *et al.* (2015) também utilizaram a técnica de tomografia para avaliar peças obtidas por Impressão 3D por extrusão, neste caso em PLA e ABS, e assim como no presente trabalho, citam que em todas as amostras analisadas foram identificados vazios gerados por fusão insuficiente entre filamentos depositados. De acordo com Agarwala *et al.* (1996), Weeren *et al.* (1995) e Huang (2014), defeitos entre filamentos depositados, tais como vazios e variações dimensionais, podem ser causados por inconsistência no fluxo de material depositado, devido a efeitos de escorregamento do filamento a ser processado no mecanismo de alimentação do cabeçote extrusor, ou variações no diâmetro do mesmo.

As características geométricas das falhas observadas neste estudo são semelhantes às identificadas por Santana *et al.* (2017c). Os autores relacionaram os problemas estruturais dos filamentos depositados, principalmente, aos efeitos do escorregamento do filamento não processado no sistema de extrusão, os quais, segundo os mesmos, são imprevisíveis e de magnitude aleatória. De acordo com Santana *et al.* (2017c), as variações na alimentação de filamento no cabeçote de impressão promoveram alterações no fluxo de material, que por sua vez geraram vazios entre filamentos vizinhos dentro das camadas, reduzindo assim a qualidade da união entre eles e, portanto, alterando as propriedades mecânicas e a massa das peças fabricadas. O estudo citado destaca ainda que os defeitos foram responsáveis por gerar uma grande variabilidade nas respostas mecânicas e de massa em grupos de peças fabricados com os mesmos parâmetros de processo.

No entanto, nesta tese, diferentemente do trabalho de Santana *et al.* (2017c), as falhas de deposição foram de menor ocorrência, não impactando assim na repetibilidade de desempenho das peças durante os testes de encaixe. Em outras palavras, as três amostras avaliadas no teste de MC, por exemplo, tanto no PLA, como no PETG, apresentaram um comportamento semelhante na força de inserção ao longo dos dez ciclos montagem — Figura 117 (a) e (b).

Além da influência de um fluxo de material não uniforme, Papon e Haque (2018) alertam ainda que vazios na interface entre filamentos podem ocorrer devido a variações em parâmetros termodinâmicos, tais como temperatura da base de impressão e taxas de resfriamento do material. Os efeitos térmicos citados pelos autores podem ter atuado também na formação das falhas encontradas neste estudo. Os defeitos, no geral, aconteceram em regiões distantes da base aquecida e, portanto, não afetadas pelo calor por ela conduzido. O calor auxilia na

molhabilidade dos filamentos depositados (fluxo lateral) e na manutenção da temperatura de interface entre estruturas para que uma boa união entre estas ocorra.

Adicionalmente, o resfriamento das peças durante a impressão, acionado após a construção das primeiras camadas, pode ter gerado flutuações na temperatura de extrusão, com consequências na estabilidade da fluidez dos polímeros, impactando na formação dos vazios entre filamentos observados. O uso do resfriamento acelera também a solidificação dos filamentos depositados, atuando assim sobre a taxa de espalhamento e acomodação dos mesmos.

O volume de  $1,00 \text{ mm}^3$  e a imagem da Figura 125 (a) (2) mostram ainda que o defeito identificado no macho em PLA foi profundo, isto é, a falta de adesão lateral entre filamentos vizinhos ocorreu também em outras camadas próximas entre si no sentido de empilhamento das mesmas. Além dos problemas de deposição, a falha observada pode ter sido agravada pelos esforços mecânicos na inserção, os quais causaram o rompimento das ligações pontuais entre os filamentos, aumentando assim o diâmetro e o volume do dano. No macho em PETG, por outro lado, a falha, aparentemente, não se propagou em outras estruturas próximas à região de ocorrência, no sentido de empilhamento das camadas, conforme pode ser observado na Figura 125 (b) (2), e em função do volume da mesma ( $0,12 \text{ mm}^3$ ). Entretanto, como no macho em PLA, o estresse gerado durante os testes de montagem pode ter colaborado para o crescimento da falha ao longo do eixo Y — Figura 125 (b) (2).

Concluída a análise das falhas com origem na deposição, ou acomodação dos filamentos depositados, o segundo padrão de avarias encontrado foi possivelmente motivado por esforços mecânicos. Diferentemente do primeiro cenário estudado, os danos causados pelos estresses gerados pelos testes de montagem ocorreram em regiões nas quais os filamentos depositados apresentavam continuidade de forma (estabilidade geométrica) e se caracterizaram por um desprendimento na linha de união com apenas um dos filamentos vizinhos, Figura 126 (a). Já as falhas de deposição geraram vazios entre ambos os lados dos filamentos depositados, Figura 126 (b).

Os danos por esforços mecânicos com maiores diâmetros foram identificados nas peças em PETG submetidas aos testes de MC ( $D_v \approx 13,91 \text{ mm}$ ;  $V_v \approx 0,58 \text{ mm}^3$ ;  $E_s = 0,17$ ) e QM ( $D_v \approx 13,25 \text{ mm}$ ;  $V_v \approx 0,18 \text{ mm}^3$ ;  $E_s = 0,17$ ) — Figura 127 (a) e (b) — e no macho em PLA avaliado na condição de montagem completa ( $D_v \approx 10,42 \text{ mm}$ ;  $V_v \approx 0,29 \text{ mm}^3$ ;  $E_s = 0,20$ ) — Figura 127 (c). Comumente, as falhas mostradas na Figura 127 (a), (b) e (c) não apresentaram sinais de deformação nas estruturas circundantes, e sim uma característica de fragilidade, o que pode

estar relacionado ao fato de terem ocorrido na linha de adesão entre filamentos, isto é, na região mais fraca das peças fabricadas pelo processo de Impressão 3D avaliado.

Os machos em PETG, em ambas as condições de ensaio, exibiram uma ruptura entre filamentos específica aos componentes construídos com este material. Como observado na Figura 127 (a) e (b), nas duas peças a falha ocorreu na mesma linha de adesão, em área próxima à zona do encastramento (de maior concentração de tensões), com diâmetro e perfis semelhantes — o que pode ser presumido pelos valores de esfericidade, iguais para este caso. As características comuns indicam que o dano pode estar relacionado às condições do processo, como estratégia de construção e mecanismos térmicos, em conjunto com as propriedades do material.

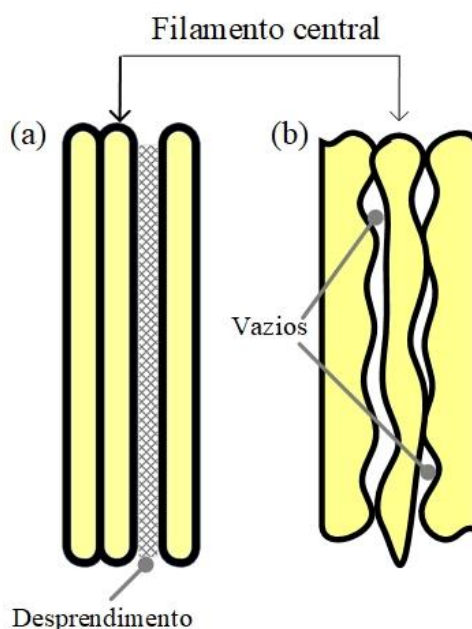


Figura 126 – Representação das falhas geradas por esforços mecânicos (a) e deposição/acomodação dos filamentos (b).

Papon e Haque (2018) descrevem que a formação da união entre filamentos, dentro e entre camadas, é impulsionada pela energia térmica do material processado e, neste sentido, o histórico térmico ao longo das sucessivas camadas é fundamental para a qualidade das ligações. Ainda de acordo com os autores, quando o material é depositado e entra em contato com uma camada previamente construída, a temperatura na interface deve permanecer acima da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do polímero antes da ligação entre os filamentos. O PETG apresenta uma  $T_g$  superior à do PLA, em torno de  $+14,3^\circ\text{C}$  ( $76,2^\circ\text{C}$ ), conforme identificado na

seção 3.4 e, portanto, necessita de mais energia térmica para garantir uma boa adesão nas interfaces.

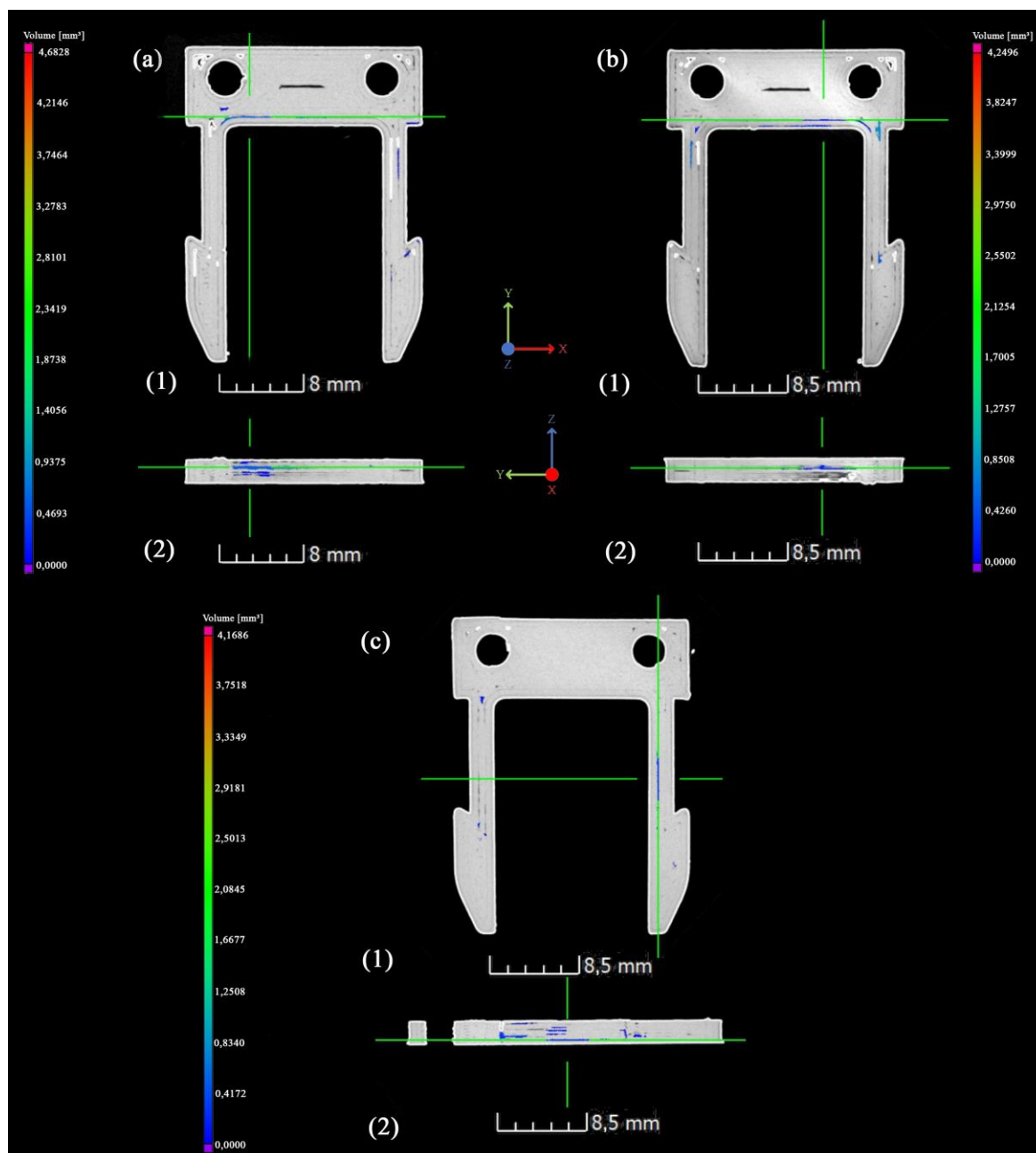


Figura 127 – Falhas geradas por esforços mecânicos: (a) PETG MC, (b) PETG QM e (c) PLA MC.

Ao se analisar o código de construção das peças em PLA e PETG, verificou-se a presença de um intervalo na sequência de deposição dos filamentos (Figura 128) relacionados à linha de adesão na qual ocorreu o desprendimento da Figura 127 (a) e (b). O primeiro filamento da zona da falha foi depositado na quarta ação de construção da camada, enquanto que a estrutura vizinha (da formação da interface) só foi fabricada na oitava etapa. Este hiato, associado a



fatores como a atuação do sistema de resfriamento, a distância da camada construída da base aquecida, das baixas velocidades de impressão (20 mm/s, uma vez que se tratava de uma região de perímetros) e do comprimento da trajetória do segundo filamento da interface, favoreceram o resfriamento das estruturas e reduziram a energia térmica necessária para uma boa conexão entre filamentos, na região em questão, dos machos em PETG.

A fraca adesão entre os filamentos depositados, associada aos maiores esforços mecânicos na zona do encastramento, geraram as grandes falhas observadas. O PLA, por necessitar de uma energia térmica menor que a do PETG, não foi afetado pelos efeitos do processo nesta região. Por fim, a avaria observada no macho em PLA, no corpo da barra, foi um dano comum, com posição aleatória, visualizado também nas peças em PETG e no componente em PLA testado em QM, e possivelmente foi gerado pelos esforços cíclicos dos ensaios de montagem.

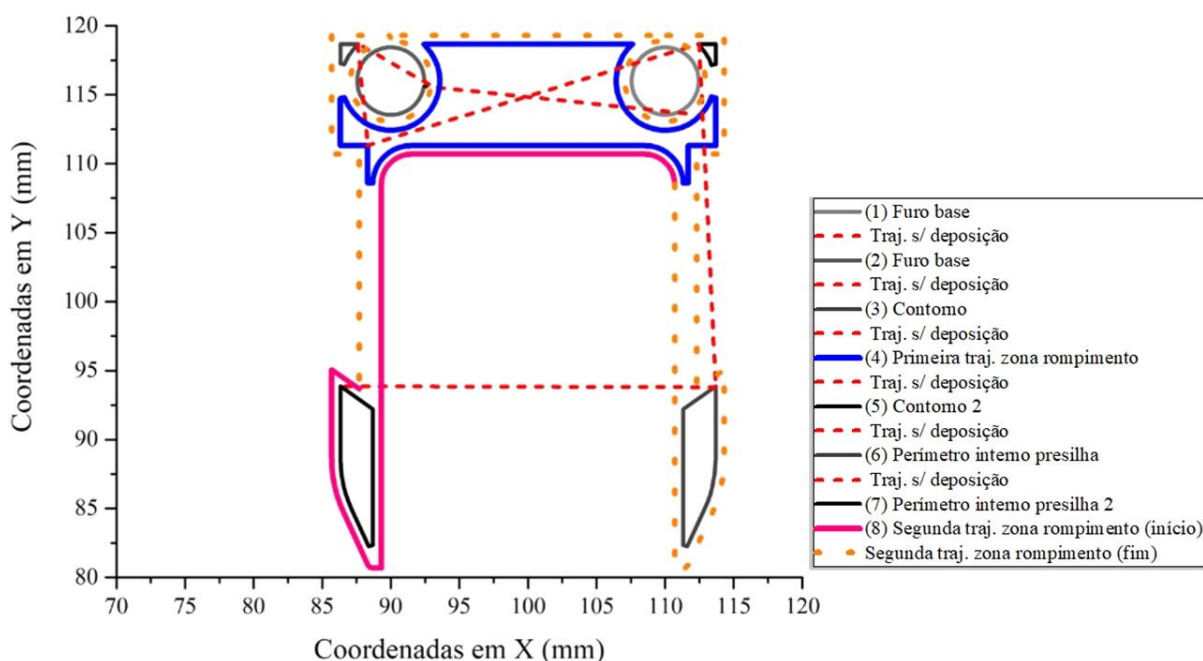


Figura 128 – Trajetórias de construção: sequência de deposições.

Os machos analisados neste estudo podem ser divididos, geometricamente, em duas partes principais: base e barras — Figura 129 (a). A compreensão auxilia no entendimento do último padrão de falha identificado nas peças avaliadas por TC. Todas as amostras analisadas apresentaram a formação de uma linha de adesão crítica, acompanhada de uma espécie de estricção — Figura 130 (a), (b) e (c) e Figura 131 — na extremidade do filamento central do preenchimento das barras, na região do encastramento — Figura 129 (a).



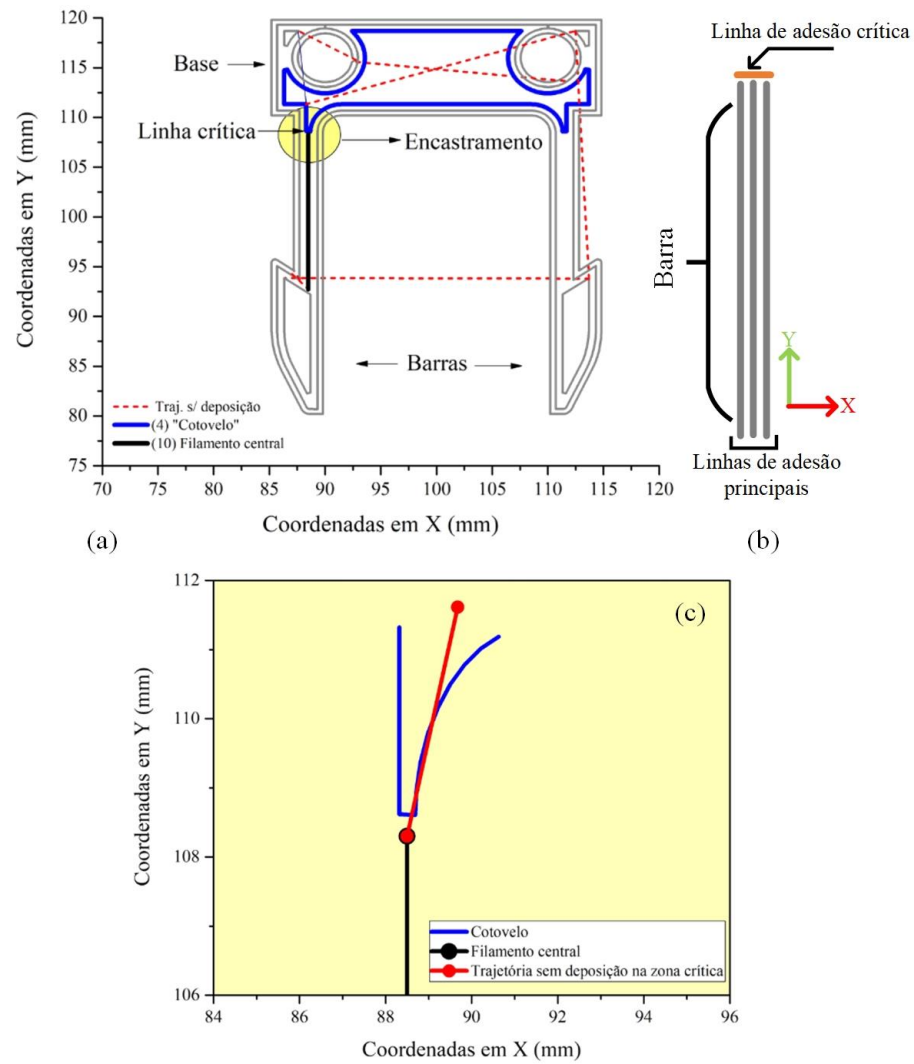


Figura 129 – Formação da linha crítica (Gcode) (a), diagrama de posição das linhas de adesão (b), detalhe das trajetórias (c).

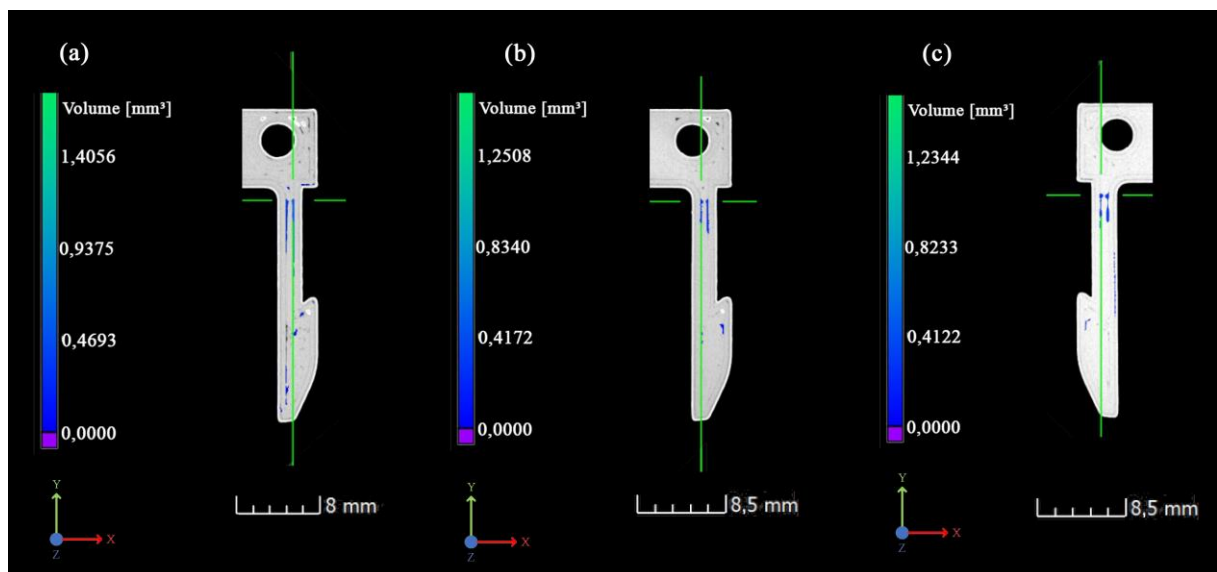


Figura 130 – Formação da estricção: (a) PETG (MC), (b) PLA (MC) e (c) PLA (QC).

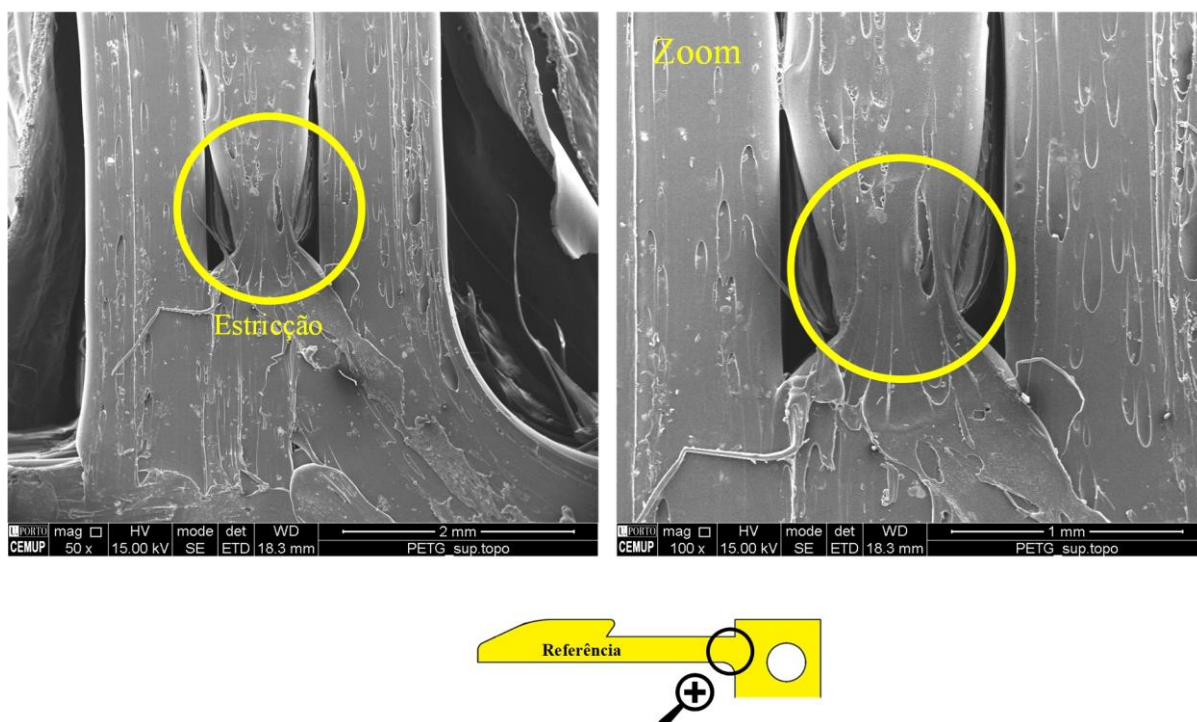


Figura 131 – Estricção, amostra em PETG (MC).

A deformação observada foi motivada principalmente pelo modo operante do Slic3r, no planejamento das trajetórias de construção, em conjunto com efeitos associados ao processo de deposição do material. Ao ser utilizada uma estratégia de construção do tipo concêntrica — Figura 113 (b) —, o *software* define as trajetórias de impressão reproduzindo, na maior parte do preenchimento, a geometria da peça através de *offsets* do desenho principal.

Contudo, no perímetro mais interno da peça há uma divisão entre as trajetórias que compõem as barras e a base do modelo. Nesta região, há a formação de uma linha de adesão entre o fim de uma trajetória retilínea (ao longo do corpo da barra), com a parte externa de um dos perímetros que formam a construção da base do macho, Figura 129 (a). Este, por sua vez, avança para o corpo da barra, formando uma espécie de “cotovelo”.

Devido a sua orientação — horizontal no plano XY, Figura 129 (b) —, a linha de adesão citada anteriormente é suscetível à possíveis ações dos esforços gerados nos testes de MC e QM, diferentemente das demais uniões nas quais os filamentos depositados suportam majoritariamente as cargas. Destaca-se também o intervalo de tempo entre as deposições do “cotovelo” (quarta ação) e do filamento central (décima ação), que pode colaborar para uma fraca adesão entre as partes, uma vez que a energia térmica necessária para acionar a ligação entre estas é reduzida pelo resfriamento do material em espera.

A aleatoriedade na sequência em que as estruturas (varreduras) foram depositadas pode ter influenciado na formação da estricção no filamento central, devido a efeitos de início e fim de trajetórias. No caso em análise, após finalizar a deposição do filamento do centro, o bico executou um movimento em vazio, isto é, sem a extrusão de material deste ponto da peça para uma outra região da mesma — Figura 129 (c). O deslocamento citado ocorre com velocidade máxima ( $\approx 130$  mm/s), ou seja, não controlada de acordo com os padrões de velocidades de impressão configuradas pelo usuário (entre 20 mm/s e 40 mm/s) e, portanto, esta transposição de movimentos entre o fim da deposição do filamento central e o início da locomoção rápida do bico pode ter ocasionado o esticamento do filamento na sua extremidade.

Além da formação de uma ligação crítica na zona de maior concentração de esforços, e a deformação do filamento central, a disposição das trajetórias de deposição em torno dessa linha de adesão em conjunto com falhas de deposição — evidenciadas pela descontinuidade geométrica dos filamentos, Figura 130 (a), (b) e (c) — favoreceram o surgimento de vazios dentro das camadas — Figura 132 —, que impediram a conexão total entre os filamentos dos perímetros externos ao filamento central e ao “cotovelo”, fragilizando ainda mais a região. A partir da fratura gerada na zona do encastramento foi possível observar que os vazios nas fronteiras da linha de adesão crítica ocorreram na maior parte das camadas, Figura 133 (a) e (b).

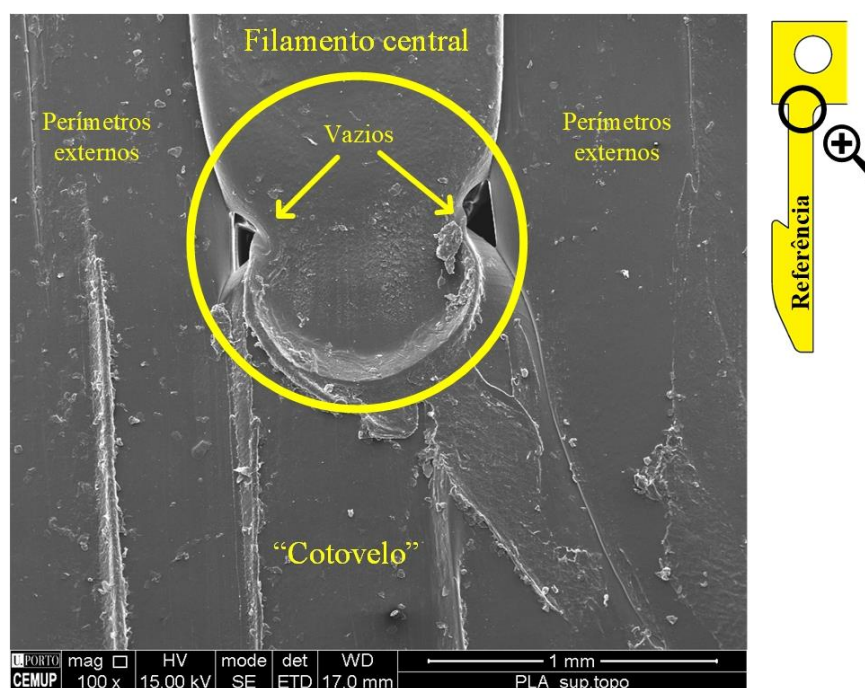


Figura 132 – Vazios em torno da zona crítica, amostra em PLA (MC).

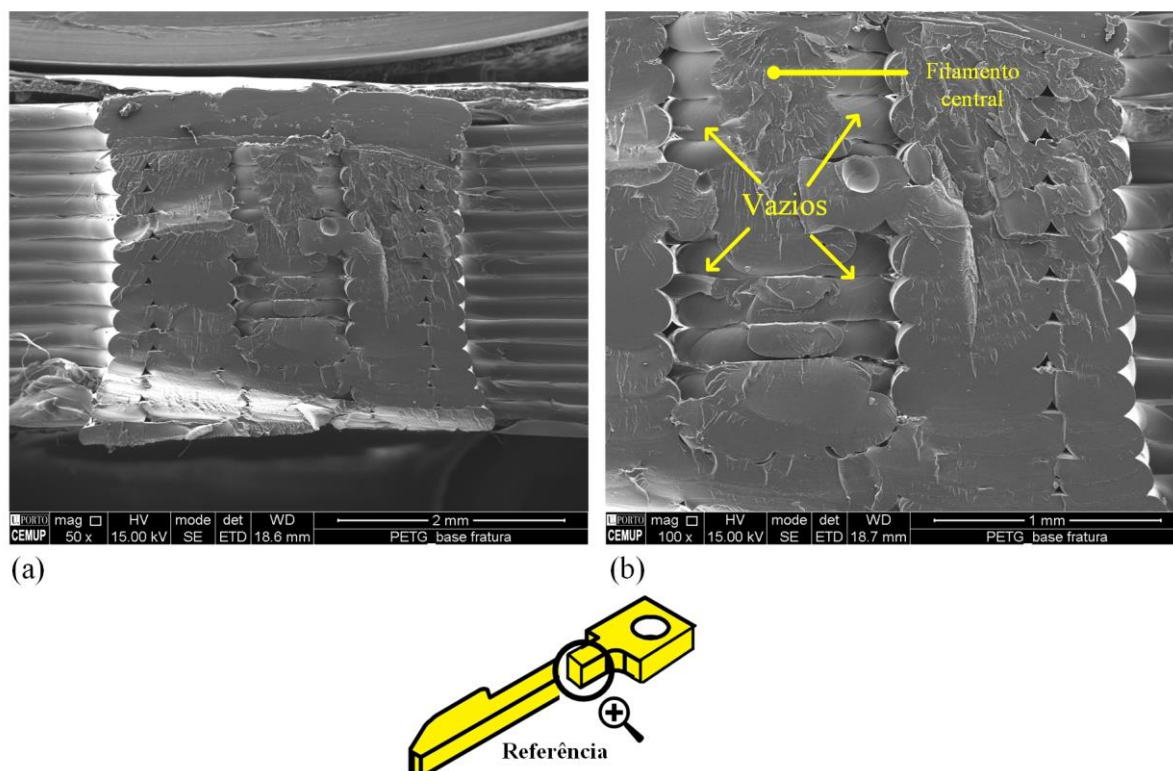


Figura 133 – Vazios ao longo das camadas, macho PETG (MC).

Com a análise de microscopia de varredura foi identificado também o início do processo de desprendimento lateral (com a formação de uma fratura) entre o filamento central e os perímetros externos, no entorno da interface crítica, Figura 134 (a) e (b). Em síntese, o último padrão de falha reconhecido foi decorrente principalmente de efeitos estruturais, que poderiam ser evitados caso o *software* tivesse inserido um filamento central contínuo ao longo de toda a interface entre a barra e a base dos machos.

Apesar de ser caracterizar como um defeito, a deformação na interface entre o filamento central e o “cotovelo” ressalta aspectos positivos quanto à atuação dos perímetros externos nessa região. Uma zona de união nas peças impressas pela tecnologia em análise, quando direcionada a esforços mecânicos, tende a falhar de forma frágil. A ausência deste tipo de dano indica que os filamentos dos perímetros amorteceram os efeitos das cargas dos ensaios de MC e QM sobre a linha de adesão.



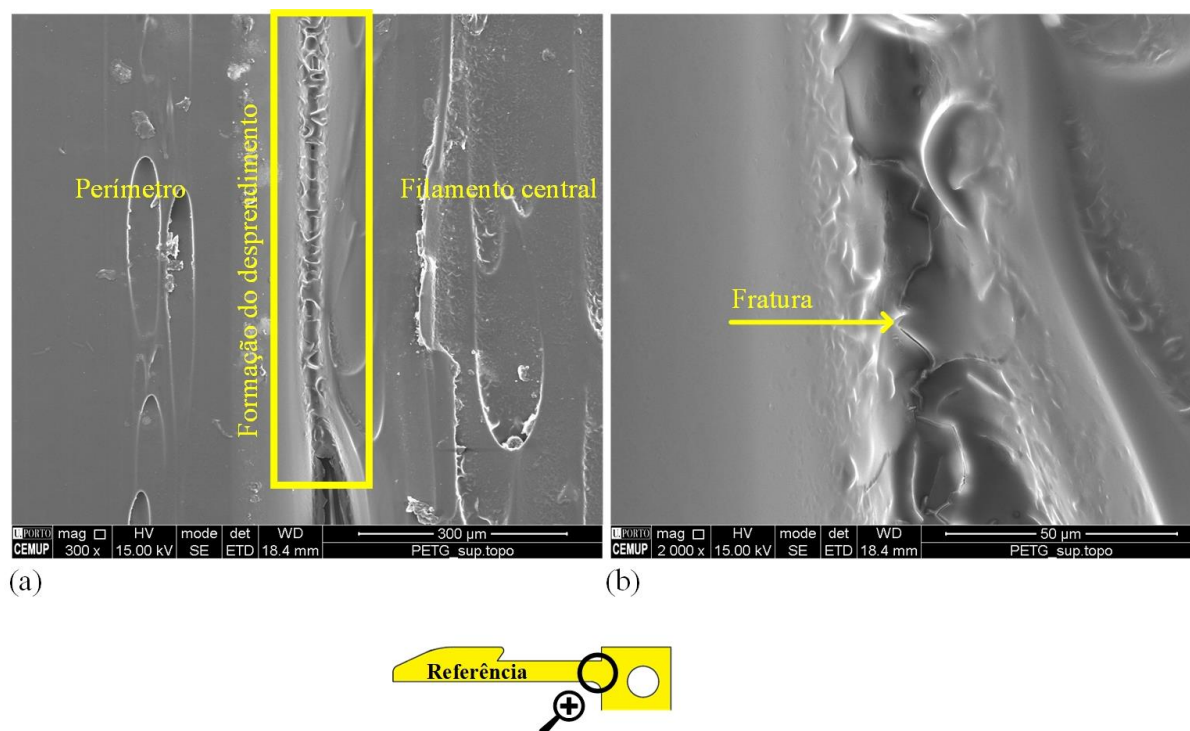


Figura 134 – Formação do desprendimento entre filamentos (a) e fratura na linha de união (b).

A análise de tomografia possibilitou ainda o levantamento de forma 3D dos machos impressos e a aferição das dimensões principais, apresentadas na Figura 112 (a). Através da sobreposição dos modelos digitalizado e CAD dos machos, além da visualização geral dos desvios dimensionais, foram verificadas também alterações no corpo das peças após os ensaios mecânicos.

As peças em PLA apresentaram uma deformação permanente nas barras no sentido do movimento de deflexão — Figura 135 (a) —, isto é, ao fim dos testes pelo menos uma das estruturas não retornou totalmente a sua posição inicial, o que é representado, principalmente, pelos desvios negativos (em azul) nas imagens da Figura 135 (b) e (c). Neste caso, são apresentados os resultados para o macho analisado em MC, no qual o efeito foi mais pronunciado, possivelmente influenciado pelos esforços manuais.

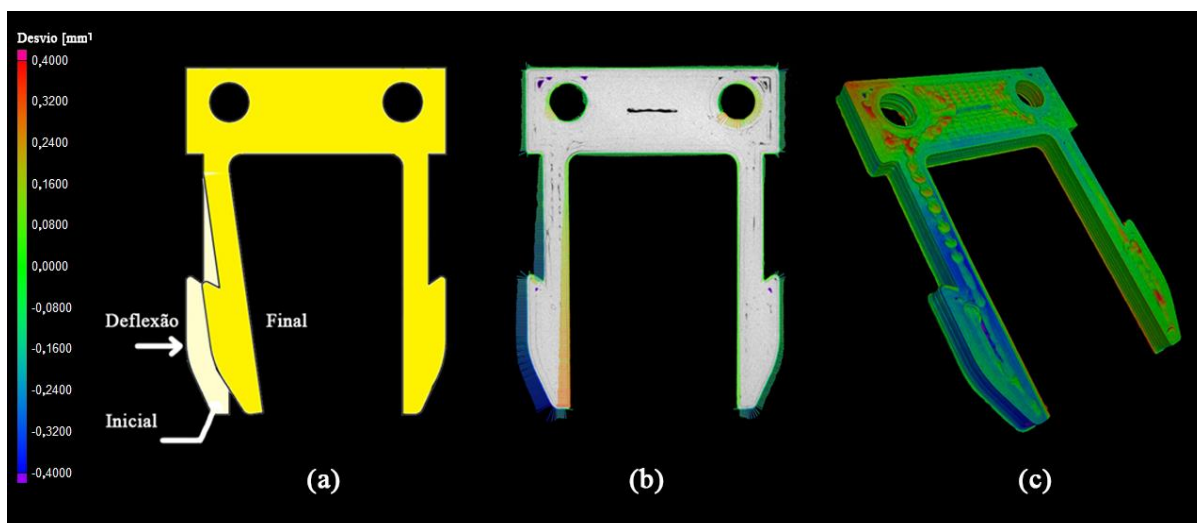


Figura 135 – Representação da deformação das barras (a) e análise de forma (b) 2D e (c) 3D, PLA (MC).

Nas peças em PETG, diferentemente das amostras em PLA, as barras retornaram ao seu estado inicial após a realização dos testes de montagem completa e quase montagem, ou seja, em um contexto geral a estrutura manteve a sua integridade de forma. Entretanto, desvios negativos foram observados na região da presilha — Figura 136 (a) e (b) —, mais acentuados na peça testada em QM, que podem estar relacionados ao desgaste pelo atrito entre as superfícies do macho e do módulo, ou por deformações plásticas localizadas nos filamentos depositados, conforme mostrado na Figura 137.

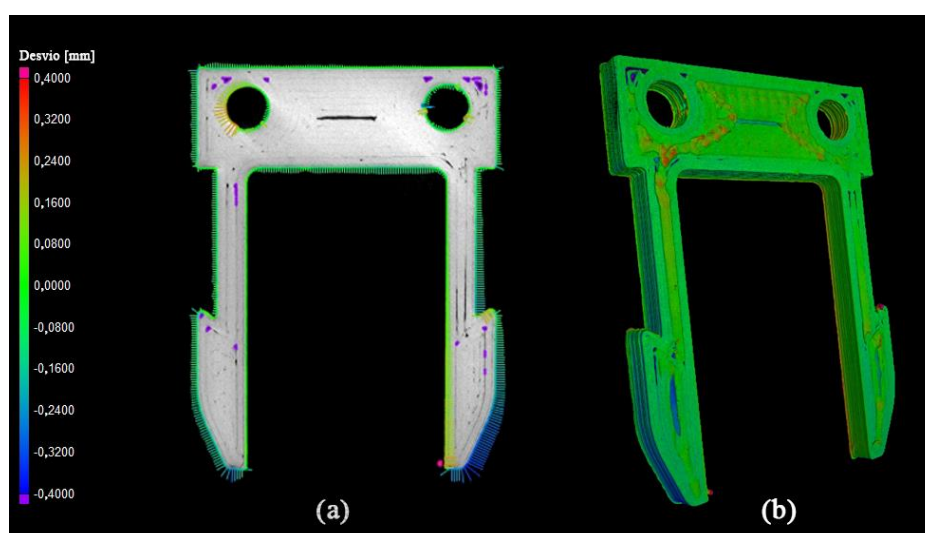


Figura 136 – Análise de forma, (a) 2D e (b) 3D, amostra PETG (QM).

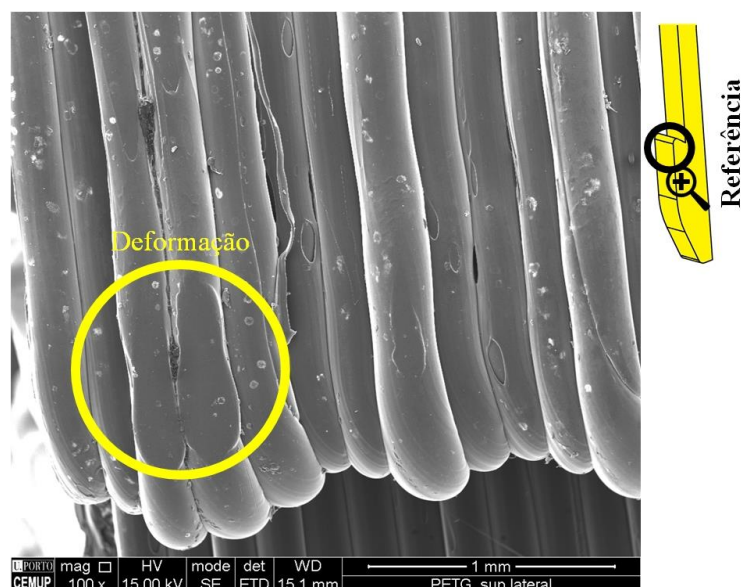


Figura 137 – Deformação/desgaste nos filamentos, presilha do macho em PETG.

Para finalizar, os resultados da análise dimensional (Tabela 40) mostram que as peças em PLA e PETG apresentaram, em um aspecto geral, valores próximos aos nominais. As variações médias nos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$ , no comprimento  $L_t$ , e na distância entre as faces externas das barras (DeF) podem ter sido causadas por efeitos aleatórios como: excesso ou acúmulo de material residual durante a deposição — regiões em vermelho, Figura 135 (c) e Figura 136 (b) —, questões relacionadas ao comportamento viscoso e de acomodação dos filamentos depositados, inchamento ou contração dos polímeros, ou desvios (por causas mecânicas ou eletrônicas) do equipamento durante a execução trajetórias.

Tabela 40 – Resultados da análise dimensional das peças em PLA e PETG analisadas por TC.

Referência	PLA		PETG	
	Média	Erro	Média	Erro
$\alpha$ (°)	$25,44 \pm 0,45$	+0,44	$25,28 \pm 0,25$	+0,28
$\beta$ (°)	$57,04 \pm 3,95$	+2,04	$55,09 \pm 7,99$	+0,09
Tb (mm)	$3,08 \pm 0,07$	+0,08	$2,96 \pm 0,03$	-0,04
Wb (mm)	$2,96 \pm 0,11$	-0,04	$2,91 \pm 0,005$	-0,09
Y (mm)	$1,95 \pm 0,06$	-0,05	$1,96 \pm 0,09$	-0,04
Lb (mm)	$14,93 \pm 0,07$	-0,07	$15,03 \pm 0,21$	+0,03
$L_t$ (mm)	$29,83 \pm 0,02$	-0,17	$29,89 \pm 0,02$	-0,11
DeF (mm)	$25,78 \pm 0,04$	-0,22	$25,81 \pm 0,02$	-0,19

Nota: os valores médios apresentados, correspondem à média das dimensões das duas barras — Figura 112 (a) —, dos dois machos de cada material, analisados pela técnica de tomografia. O erro, por sua vez, equivale à diferença entre o valor médio medido e o correspondente nominal de cada dimensão, expressos na unidade de cada uma das referências.

#### 4.1.2 Conclusões sobre o estudo dos *snap-fits* impressos (Parte 1)

As respostas obtidas neste estudo indicam uma importante contribuição do tipo de material e de suas propriedades mecânicas para o desempenho de *snap-fits* fabricados pelo processo de Impressão 3D por extrusão. Em outras palavras, a performance — caracterizada pelo critério da força de inserção — dos componentes pode ser avaliada pelo aspecto global das estruturas e não limitado somente à análise pontual entre camadas ou filamentos individuais e suas linhas de adesão. Tal constatação é evidenciada uma vez que as peças em PETG, comparadas às de PLA, apresentaram, em um aspecto geral, falhas (deposição, desprendimento entre filamento, entre outras) com maiores dimensões e, ainda assim, responderam melhor aos esforços cíclicos aos quais foram submetidas.

Um bom exemplo desse comportamento foram as peças em PETG avaliadas no teste de quase montagem (QM), que apresentaram um maior número de vazios com diâmetros entre (10,5 e 13,5) mm e mantiveram grandes patamares de estabilização da força de inserção. É importante ressaltar que as falhas identificadas com as análises de tomografia e microscopia afetaram a integridade das peças e, portanto, colaboraram para a variação da força de inserção, inclusive nos machos em PETG. Contudo, os efeitos das falhas sobre a alteração da força de montagem foram amenizados, no caso do PETG, ou agravados, no PLA, em função das características específicas de cada um dos materiais.

Em síntese, o perfil flexível do PETG, conforme suposto na etapa de análise das propriedades mecânicas dos polímeros, demonstra que o material é recomendado para a aplicação em *snap-fits*. Entretanto, desenvolvimentos no projeto e parametrização das peças devem ser feitos para melhorar o desempenho de componentes em PETG quando submetidas a esforços manuais, isto é, de magnitude aleatória. A necessidade é exposta nos testes de montagem completa (MC), nos quais as quedas na força de inserção dos machos em PETG foram semelhantes às dos componentes em PLA.

Quanto ao PLA, os resultados deste estudo corroboram os conceitos apresentados por Tronvoll *et al.* (2018) de que o material é pouco adequado para aplicação em *snap-fits*. A maior ocorrência de deformações permanentes no corpo dos filamentos e na estrutura/geometria das peças confirma que o polímero não responde bem às aplicações com cargas cíclicas. No entanto, o mesmo, devido as suas boas propriedades mecânicas e rigidez, pode ser utilizado para cenários onde se deseja uma montagem única.

Outra contribuição importante deste estudo, considerando uma aplicação com baixo atrito, foi que as peças em PLA e PETG não apresentaram delaminação entre as camadas, o que



vai de encontro ao cenário apresentado por Klahn *et al.* (2016) e, portanto, mostra uma evolução da tecnologia de Impressão 3D por extrusão no que diz respeito à qualidade da união entre filamentos depositados. Os estudos de calibração (seções 3.2 e 3.3) realizados ao longo desta tese contribuíram para as respostas satisfatórias na qualidade dimensional dos machos impressos em ambos os materiais.

Mais uma vez, no contexto global desta investigação, os resultados obtidos apontam para uma influência do *software* de fatiamento na qualidade das peças. O planejamento das trajetórias de deposição conduziu à formação de uma linha de adesão crítica na zona do encastramento das peças, à inserção de vazios, e a um processo de deformação nesta região, que contribuíram para a redução de desempenho dos machos. O efeito conduz à reflexão de que o uso de uma estratégia de deposição concêntrica é efetiva para gerar filamentos unidirecionais, dentro e entre camadas, em peças com geometrias simples (retangulares, por exemplo). Quando se tratam de desenhos complexos, o *software* demonstra dificuldades para definir as interfaces e a composição das reproduções sucessivas do perfil do componente.

Por fim, novos estudos devem ser realizados para melhorar a compreensão do comportamento elástico do PLA e do PETG em condições dinâmicas, e para testar a variação da força de inserção na interação entre peças impressas.

## 4.2 PARTE 2: INTERAÇÃO ENTRE PEÇAS IMPRESSAS

A investigação nesta etapa foi dividida em dois estudos de caso. O primeiro teve como objetivo avaliar peças fabricadas pelo processo de Impressão 3D por extrusão, em PLA e PETG, em dois testes: (i) Análise Dinâmico-Mecânica (DMA), com o intuito de avaliar o comportamento viscoelástico e de relaxamento das tensões dos polímeros; e (ii) medição da força de inserção em conexões *snap-fit* (macho e fêmea) com uma condição de interação entre superfícies impressas. Para o DMA foram utilizados corpos de prova com perfil retangular e com dimensões de (35x 5 x 1,30) mm. Já para a medição da força de inserção foi utilizado o mesmo padrão de macho do estudo anterior (seção 4.1), Figura 112 (a). A fêmea, apesar do ajuste para um modelo a ser impresso, manteve as mesmas dimensões internas do módulo de teste em Poliacetal (POM) — Figura 138 (a) e (b).

Em ambos os ensaios, duas configurações de impressão foram utilizadas para construir as amostras. Na Figura 139 é apresentado um esquemático demonstrando os tipos e o número de peças para cada um destes, impressas por configuração. No total foram confeccionadas 18 amostras em PLA e 18 em PETG — seis na configuração (1) e 12 na (2).

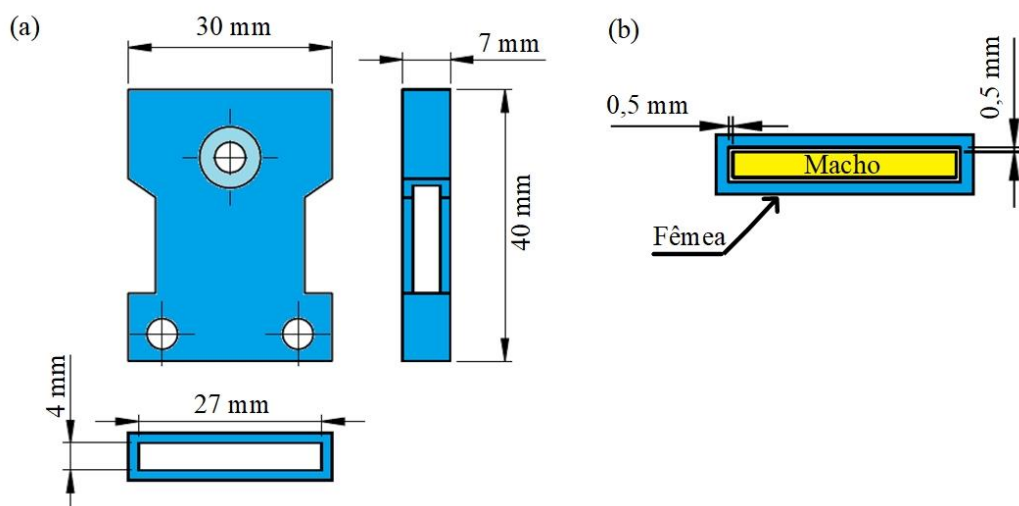


Figura 138 – Dimensões da fêmea impressa (a) e folgas (b).

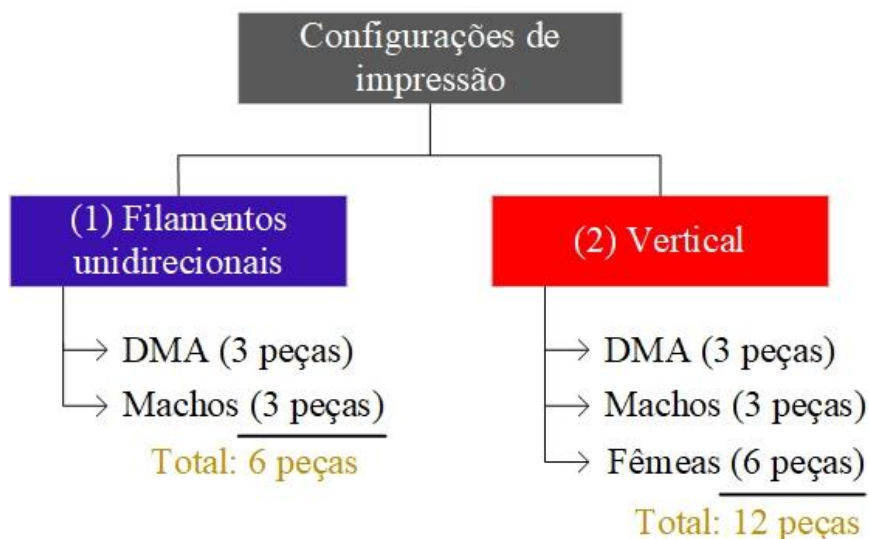


Figura 139 – Planejamento da construção das amostras.

Uma breve descrição de cada uma das configurações, bem como o objetivo da sua aplicação, é apresentada a seguir:

- (1) filamentos unidirecionais: combinação de uma orientação de construção “no plano”, para os machos, e de uma “lateral”, para amostras do DMA, com uma estratégia de deposição concêntrica (reproduções sucessivas do perfil das peças) — Figura 140 (a) e (b). A diferença na orientação de construção dos machos e dos corpos de prova para o DMA está relacionada à geometria das amostras, ao planejamento da impressão, e à direção de aplicação das cargas nos ensaios, de forma a se obter filamentos

unidirecionais dentro e entre camadas e dispostos a suportar os esforços mecânicos preservando as linhas de adesão — Figura 141 (a);

- (2) vertical: uso de uma orientação de construção vertical em conjunto com a estratégia de deposição concêntrica — Figura 140 (a) e (b). Trata-se de um arranjo paramétrico crítico — principalmente pela orientação de construção —, no que está relacionado à resistência mecânica, uma vez que tanto nos testes de força de inserção como no DMA, os esforços gerados são aplicados diretamente na linha de adesão entre camadas (no sentido de empilhamento, eixo Z), ou seja, uma das regiões mais fracas nas peças fabricadas pela tecnologia em análise — Figura 141 (b). A abordagem foi realizada pois em algumas situações de impressão pode ser necessário o uso de tal orientação de construção para a fabricação de elementos da conexão *snap-fit* a fim de evitar, por exemplo, o uso exagerado de material de suporte e diminuir o tempo de construção.

Em síntese, o principal parâmetro de impressão variado nas configurações (1) e (2) foi a orientação de construção, mantendo-se fixa a estratégia de deposição. Os ajustes das demais variáveis do processo, também mantidas fixas, são os mesmos já apresentados na Tabela 38 da seção 4.1. Assim como no estudo anterior, todas as amostras foram fabricadas individualmente.

Conforme mostrado nas Figuras 139 e 140 (a), apenas a fêmea da conexão *snap-fit* foi fabricada com uma única condição paramétrica — configuração (2). A estratégia foi adotada para atender a dois aspectos: (i) evitar o uso de suportes, ou distorções decorrentes do processo, em zonas de, ou de provável, contato com o macho — Figura 142 (a); e (ii) permitir avaliar os conceitos de deslizamento entre partes impressas, analisados no estudo do plano inclinado — Figura 142 (b) e (c). Relativamente ao segundo aspecto, foram estudadas condições de deslizamento entre superfícies com ângulos de face de  $90^\circ|0^\circ$ <sup>54</sup> — sendo o macho o elemento com filamentos a  $0^\circ$  e a fêmea a  $90^\circ$  — e  $90^\circ|90^\circ$  — isto é, ambos os elementos da conexão com superfícies com filamentos a  $90^\circ$ .

---

<sup>54</sup> Mantendo o mesmo código para interações entre superfícies utilizado no estudo do plano inclinado, sendo, neste caso, a fêmea o equivalente à superfície de interação e o macho, ao bloco padrão.

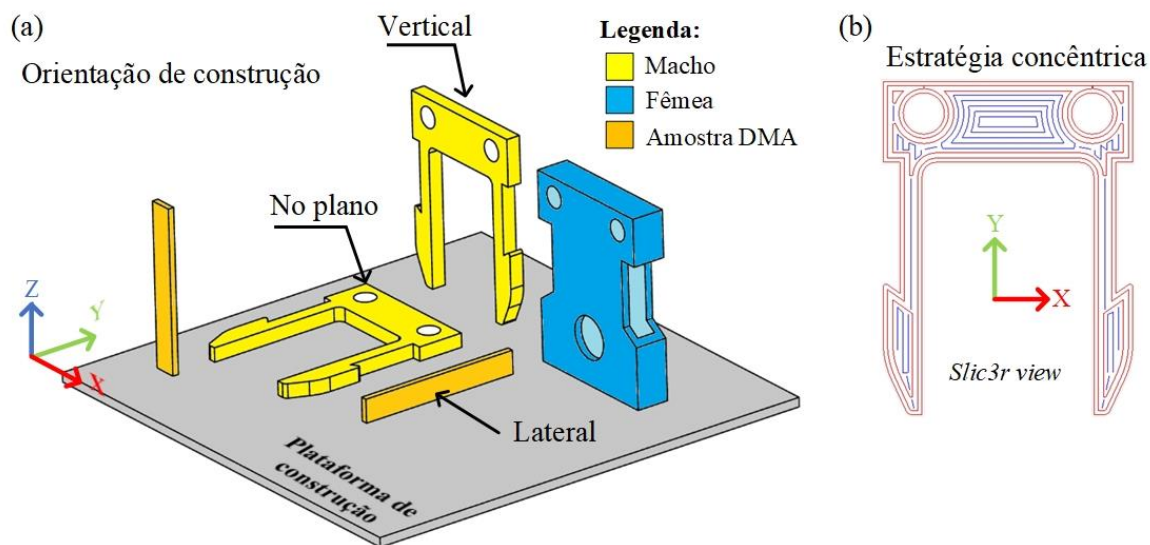
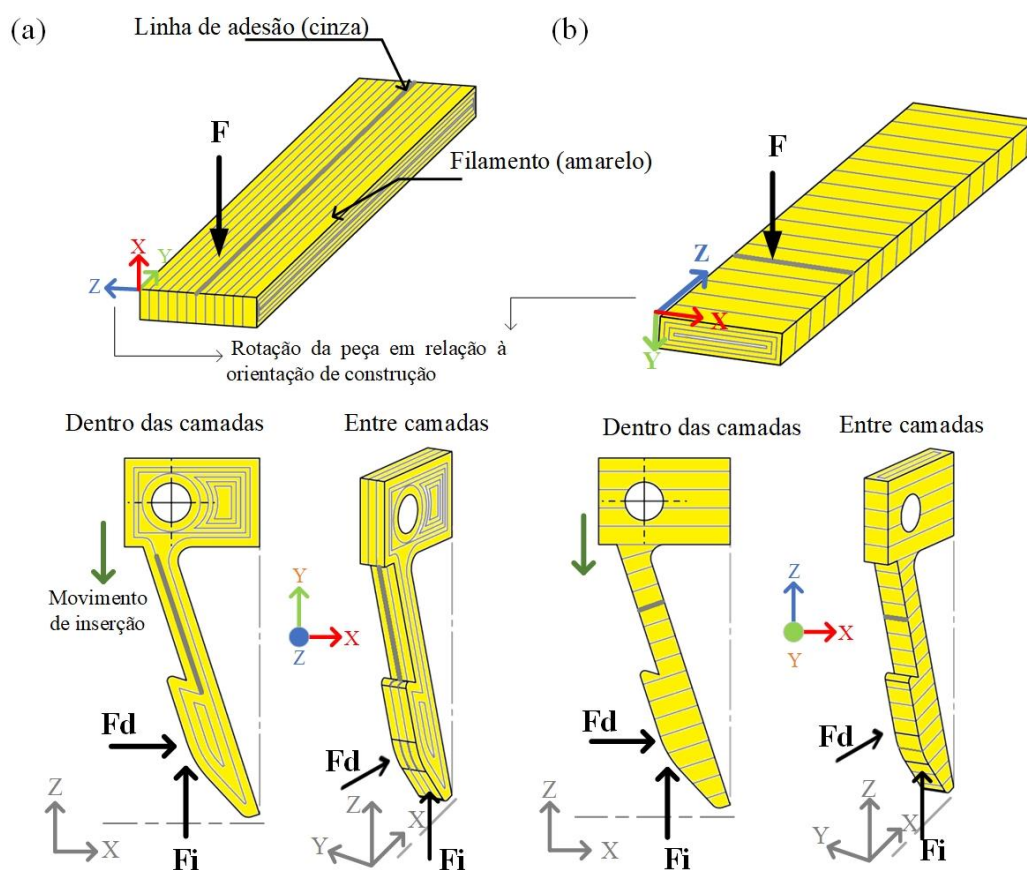


Figura 140 – Orientação de construção (a) e estratégia de deposição concêntrica (b).



Obs: os sistemas de referência coloridos correspondem à orientação de construção dos machos; os cinzentos, ao movimento de inserção

Figura 141 – Disposição dos filamentos em relação às cargas, configuração (1) (a) e 2 (b).

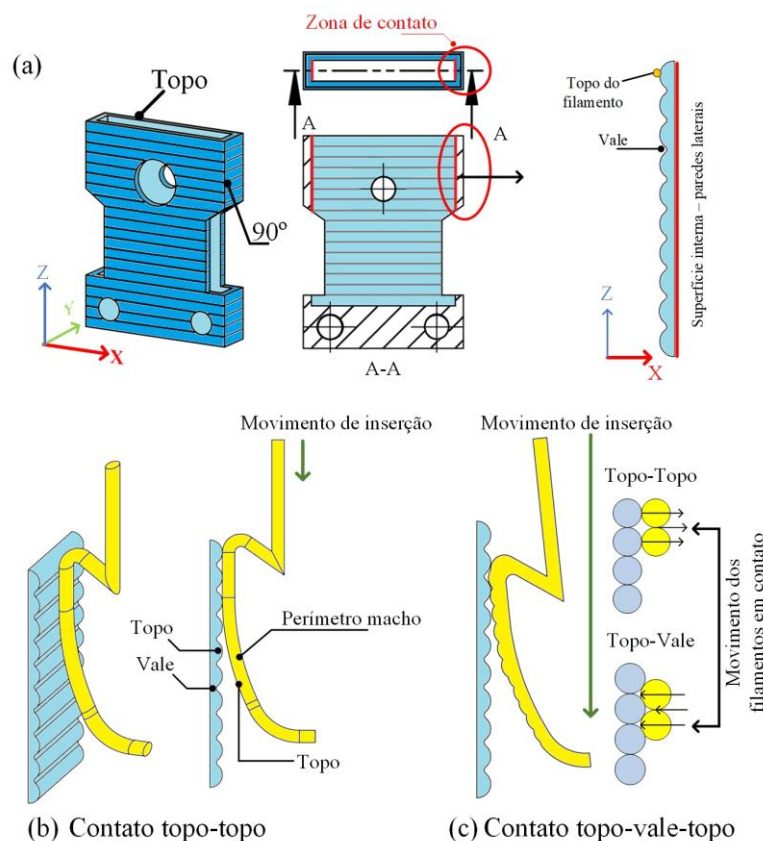


Figura 142 – Superfície interna da parte fêmea (a), contato/deslizamento com o macho nas configurações 1(b) e 2 (c).

A condição de interação  $90^\circ|0^\circ$ , além de favorecer o movimento entre as superfícies, uma vez que só há contato entre o topo dos filamentos depositados de ambas as peças — Figura 142 (b) —, também se caracteriza por ser a situação que garante maior resistência mecânica ao macho (filamentos unidirecionais). Já a interação  $90^\circ|90^\circ$  favorece o “encaixe” entre o topo e o vale dos filamentos das superfícies em contato, dificultando o deslizamento entre estas e gerando um movimento oscilatório — Figura 142 (c) —, sendo crítica também nas questões de resistência mecânica.

A medição da força de inserção, Figura 143 (a) e (b), foi realizada em uma bancada de testes *MultiTest 2.5 – dv (Mecmesin)*, a qual dispõe de um dinamômetro com célula de carga de 2,5kN (resolução de 0,5N). Os ensaios foram executados com base no método de “montagem completa (MC)” (seção 4.1) — Figura 115 (a) — e os valores de força foram obtidos ao longo de dez ciclos de inserção. Para efeitos comparativos, foram calculados valores teóricos para a força de inserção, considerando um sistema *snap-fit* impresso e um injetado, em PLA e PETG (Tabela 41). As informações para tal estimativa matemática foram obtidas a partir da geometria

dos machos e das características dos materiais, oriundas dos ensaios mecânicos de tração e da medição do coeficiente de atrito (no caso dos impressos).

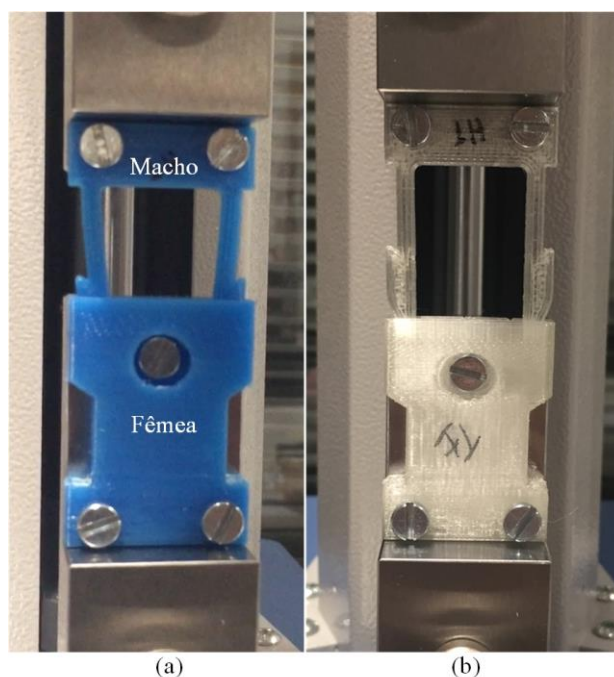


Figura 143 – Ensaio de medição da força de inserção, amostras em PLA (a) e PETG (b).

Tabela 41 – Valores teóricos da força de inserção para componentes impressos e injetados.

Parâmetros	PLA (90° 0°)	PETG (90° 0°)	PLA (Injetado)	PETG (Injetado)
$E_s$ (MPa)	4236	2087	2763	1545
$\mu$ (ua.) <sup>55</sup>	0,14	0,16	0,16 (BĚHÁLEK <i>et al.</i> , 2012)	0,22 (KLÖCKNER PENTAPLAST, 2015)
$F_i$ (N)	25,76	13,24	17,53	11,08

Nota: módulo secante ( $E_s$ ), coeficiente de atrito ( $\mu$ ), força de inserção ( $F_i$ ).

Para finalizar a descrição do primeiro estudo de caso, o ensaio de DMA foi executado no modo *single cantilever*, com o intuito de analisar, conforme mencionado anteriormente, o relaxamento das tensões e a variação das propriedades viscoelásticas, necessárias para gerar uma deflexão de 2 mm nas peças em PLA e PETG ao longo de um intervalo de tempo de 35 min. Os experimentos foram conduzidos em um equipamento TA Q800, em uma condição isotérmica (30°C), com frequência de oscilação de 1Hz.

<sup>55</sup> Os valores de coeficiente de atrito para peças impressas em PLA e o PETG foram obtidos na seção 3.5, e correspondem aos resultados da interação entre a face do bloco padrão em 0° (assumido como o macho) e a da superfície de interação em 90° (em alusão à fêmea), apresentados nas Tabelas 33 e 34.

É importante mencionar que a deflexão de 2 mm foi selecionada com o intuito de se aproximar ao comportamento em operação do elemento macho da conexão *snap-fit* avaliada neste estudo. Tal valor é equivalente à dimensão (parâmetro geométrico) “Y” da Figura 112 (a). Entretanto, no ensaio de DMA em *single cantilever*, diferentemente do que acontece ao longo do movimento de inserção do macho, a deflexão ocorre em dois sentidos, isto é, a amostra é deslocada em (+2 e -2) mm em relação à posição inicial, Figura 144.

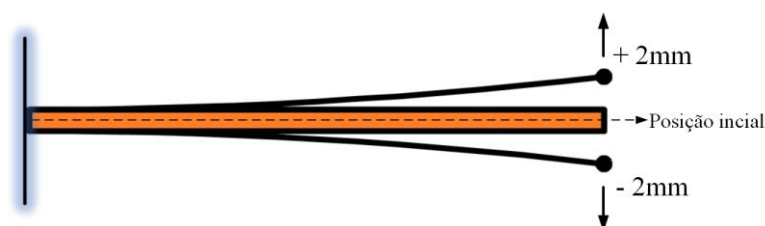


Figura 144 – Dinâmica do ensaio de DMA.

O segundo estudo de caso consistiu em comparar o desempenho, com base no critério da força de inserção, dos *snap-fits* fabricados por Impressão 3D por extrusão — avaliados no primeiro estudo — com o de elementos (com as mesmas geometrias e dimensões) obtidos em processos de Manufatura Aditiva de alto desempenho e custo. Três conjuntos de conexões (macho e fêmea) foram confeccionados por Sinterização Seletiva a *Laser* (SLS) e outros três pela tecnologia *PolyJet*®, Figura 145 (a) e (b). Informações sobre os materiais e os equipamentos utilizados encontram-se sintetizadas no Quadro 6.

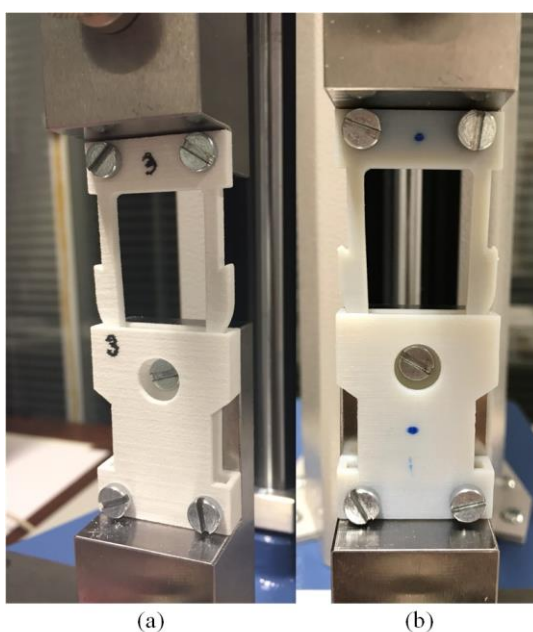


Figura 145 – Conexões *snap-fit* em SLS (a) e *PolyJet*® (b).



Quadro 6 – Especificações dos processos SLS e *PolyJet*® utilizados.

<b>Informações</b>	<b>SLS</b>	<b><i>PolyJet</i>®</b>
Equipamento	sPro 60 HD-HS (3D Systems)	Object Eden 260V (Stratasys)
Material	PA 2200 balance 1.0 (Poliamida 12)	VeroGray
Módulo de <i>Young</i>	1,65 GPa (direções X, Y e Z)	2,50 GPa
Resistência à tração	48 MPa (direções X e Y) e 42 MPa (direção Z)	58 MPa
Deformação até a ruptura	18% (direções X e Y) e 4% (direção Z)	10% à 25%
Configurações de Impressão	Espessura de camada (0,1 mm); orientação de construção (0° em Y e Z, e 30° em X); potência do <i>laser</i> (18W).	PolyJet HD; espessura de camada (16µm); orientação “no plano” (machos) e vertical (fêmea).
Local de fabricação	Centimfe (Marinha Grande)	LDPS - FEUP
Notas: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ As propriedades mecânicas dos materiais foram obtidas a partir dos <i>datasheets</i> fornecidos pelas empresas EOS (PA2200 balance 1.0) (EOS, 2010), e Stratasys (VeroGray) (STRATASYS, 2015);</li> <li>○ Centimfe (Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos);</li> <li>○ LDPS (Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviço)</li> </ul>		

#### 4.2.1 Resultados e discussões

A apresentação e discussão dos resultados foi dividida em dois subtópicos, correspondentes aos estudos de caso 1 e 2. Especialmente no estudo 1, serão apresentados dois títulos para separar as análises de DMA e a medição da força de inserção.

##### 4.2.1.1 Estudo de caso 1

#### (I) Análise de DMA

Nas Tabela 42 são apresentados os resultados médios das respostas obtidas no ensaio de DMA, com as peças em PLA e PETG fabricadas com as configurações de impressão (1) e (2). São disponibilizados os maiores e os menores valores identificados nos testes.

Segundo Canevarolo (2006), a estrutura molecular dos materiais poliméricos garante a estes um comportamento viscoso, como o dos líquidos, associado a um elástico, dos sólidos Hookeanos. O fenômeno, conhecido como viscoelasticidade, está relacionado à complexidade do comportamento dos polímeros. Materiais clássicos, em sua maioria, exibem característica elástica ou viscosa em resposta a um esforço aplicado. Quando submetidos a um esforço, os materiais elásticos deformam, e essa deformação é completamente recuperada quando as cargas são removidas. Em outras palavras, o elemento armazena energia e, portanto, pode devolvê-la



completamente ao sistema quando os esforços são retirados. Nos materiais viscosos, por sua vez, quando um estresse é empregado, resulta em uma deformação que cresce proporcional ao tempo, até que as cargas sejam removidas. Tal deformação não é recuperável, ou seja, é completamente retida, pois a energia é perdida para o sistema (SEPE, 1998; AFROSE, 2016b).

Tabela 42 – Resultados da análise de DMA com amostras obtidas nas configurações (1) e (2).

Respostas	Configuração (1)			
	PLA		PETG	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
*Força (N)	18,11 ± 0,00	12,57 ± 1,93	11,28 ± 0,20	9,27 ± 0,49
Tensão (MPa)	41,08 ± 0,31	28,50 ± 4,17	30,63 ± 1,71	25,19 ± 2,02
E' (MPa)	1222,64 ± 15,45	768,48 ± 114,03	877,16 ± 74,25	721,27 ± 74,29
E'' (MPa)	60,77 ± 50,79	50,79 ± 2,73	24,18 ± 1,28	19,11 ± 2,51
tan (δ) (u.a)	0,07 ± 0,01	0,05 ± 0,00	0,03 ± 0,00	0,02 ± 0,00
Respostas	Configuração (2)			
	*Força (N)	13,90 ± 1,25	1,33 ± 0,52	7,53 ± 0,18
	Tensão (MPa)	33,44 ± 3,20	3,21 ± 1,23	15,17 ± 0,25
	E' (MPa)	869,26 ± 91,02	83,48 ± 31,65	374,35 ± 12,81
	E'' (MPa)	69,86 ± 10,29	12,56 ± 1,32	42,39 ± 3,00
	tan (δ) (u.a)	0,08 ± 0,00	0,17 ± 0,08	0,12 ± 0,00
	0,11 ± 0,01			

Notas:  
 módulo de armazenamento (E') e módulo de perda (E'');  
 \* Força necessária para gerar uma deflexão de 2 mm.

O desempenho de um material viscoelástico pode ser medido através de um ensaio de DMA, em termos de módulo de armazenamento (E') e de perda (E''), fator de perda (tan δ), relaxamento das tensões, entre outros (SEPE, 1998; CROMPTON, 2006; LORANDI *et al.*, 2016). O módulo E' corresponde à energia absorvida e recuperada pela resposta elástica em cada ciclo de aplicação de cargas, enquanto E'' consiste na energia perdida — dissipada na forma de calor —, devido à resposta viscosa, ao longo dos ciclos (LORANDI *et al.*, 2016; LEAL-JUNIOR *et al.*, 2018).

Um exemplo simples para a definir E' e E'' consiste em soltar uma bola viscoelástica sobre uma superfície (Figura 146)<sup>56</sup>. A altura que esta retorna (P3) após o contato com a superfície (quão alto a bola “quicou”) corresponde à energia armazenada elasticamente (E'). Já E'' representa a energia perdida pela bola — diferença entre a altura inicial (P1) e a posição alcançada com o “quique” (P3) —, na forma de calor, durante a colisão (SPERLING, 2006;

<sup>56</sup> A Figura 146 foi produzida pelo autor desta tese, através de um experimento real de lançamento de uma bola em uma superfície. As imagens foram captadas através de um vídeo em câmera lenta, e depois sobrepostas. O experimento, por sua vez, foi realizado com base nos conhecimentos descritos por Sperling (2006), Menard (2008) e Oliveira (2013).

MENARD, 2008; OLIVEIRA, 2013). Por fim, o fator de perda ( $\tan \delta$ ) equivale à razão — Eq. (6) — entre o módulo de perda e o de armazenamento (LORANDI *et al.*, 2016):

$$\tan(\delta) = \frac{E''}{E'} \quad \text{Eq. (6)}$$

Os conceitos apresentados anteriormente são importantes para fundamentar as discussões sobre os resultados da análise de DMA realizadas nesta pesquisa. Os gráficos das Figuras 147 e 148 representam, respectivamente, o comportamento ao longo do tempo das respostas  $E'$ ,  $E''$  e  $\tan(\delta)$  para uma peça em PLA e outra em PETG, fabricadas com a configuração de impressão (1) (filamentos unidirecionais). Os resultados apresentados correspondem às amostras, em cada um dos materiais, que obtiveram os maiores valores para as respostas avaliadas.

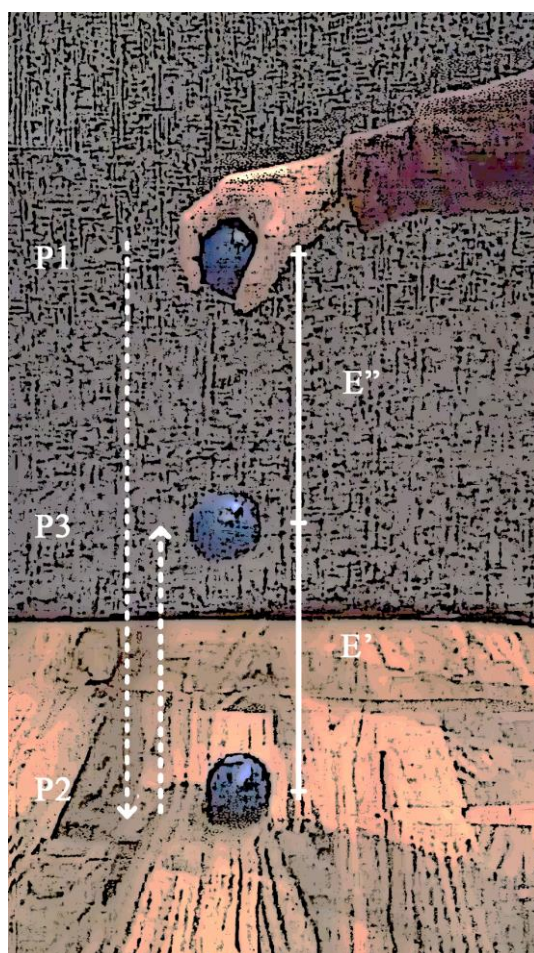


Figura 146 – Representação prática dos módulos de armazenamento ( $E'$ ) e perda ( $E''$ ).

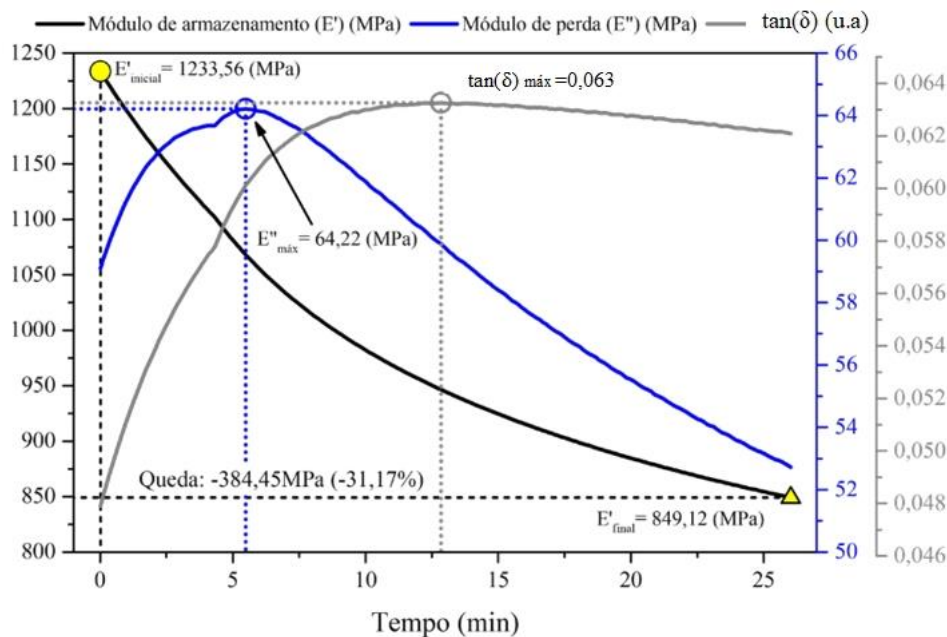


Figura 147 – Comportamento de  $E'$ ,  $E''$  e  $\tan(\delta)$  ao longo do tempo, amostra em PLA configuração (1).

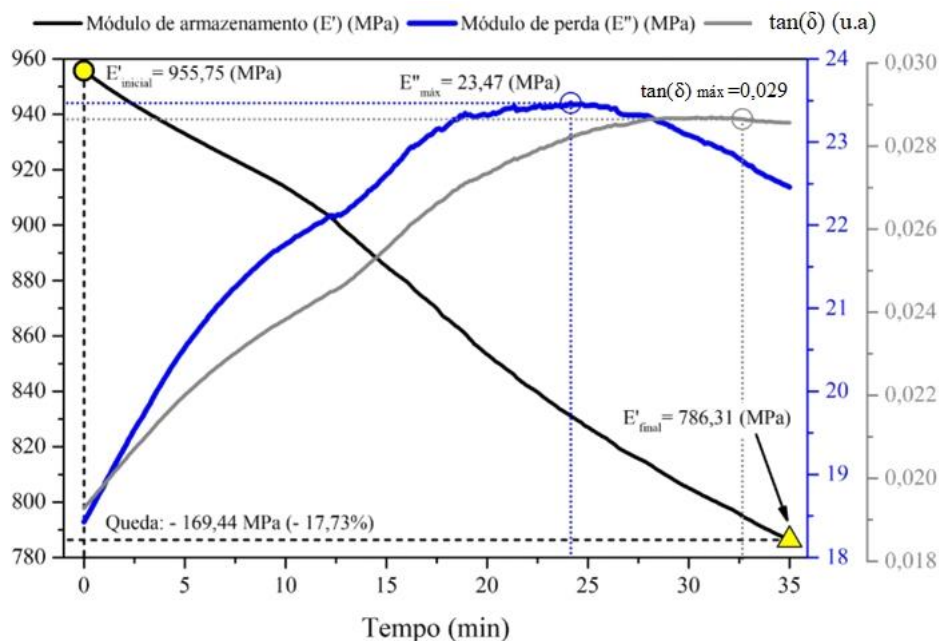


Figura 148 – Comportamento de  $E'$ ,  $E''$  e  $\tan(\delta)$  ao longo do tempo, amostra em PETG configuração (1).

Ao se analisar os valores médios de  $E'$ , Tabela 42, verificou-se que o PLA é aproximadamente 1,4 vez, ou +39,4%, mais rígido que o PETG, considerando o cenário em que as amostras foram fabricadas com a configuração de impressão (1). Tal comportamento corrobora os resultados obtidos, para amostras com a mesma parametrização, nos ensaios mecânicos estáticos (seção 3.4), sendo que naquela situação, a razão entre o módulo de *Young*

dos materiais foi em torno de 2 vezes. Apesar da maior rigidez, o PLA, em relação ao PETG, apresentou menor capacidade de absorção de energia ao longo dos ciclos, isto é, menor potencial elástico, e um comportamento frágil.

Como pode ser observado nos exemplos das Figuras 147 e 148, as variações no módulo de armazenamento ( $E'$ ) (linha em preto) — isto é, a diferença entre o valores do módulo no início e no fim do ensaio — foram de aproximadamente -384,45 MPa (-31,17%) para o PLA, e -169,44 MPa (-17,73%) para o PETG. Outro fator a ser destacado nos gráficos acima é que as amostras de PETG suportaram as cargas cíclicas até o fim do teste (35 min) (Figura 148), enquanto que nos elementos em PLA os ensaios foram interrompidos antes do término — com aproximadamente 26 min, no caso da Figura 147 — devido à ocorrência de fraturas — Figura 149 (a).

Tais fraturas traduzem a fragilidade inerente do PLA, já descrita na literatura por Kumar *et al.* (2010), Bai *et al.* (2012), Wang *et al.* (2017), García-Campos *et al.* (2018) e Buys *et al.* (2018). As fraturas ocorreram na direção da aplicação das cargas no ensaio de DMA — Figura 149 (b) — e, através da análise da região da fratura — secção transversal da amostra, Figura 149 (c) —, foi possível verificar que os filamentos centrais da peça, devido ao branqueamento intenso nesta zona, foram as estruturas que mais suportaram os esforços aplicados.

A maior capacidade de armazenar energia, em função da menor variação de  $E'$  (Figura 148), associada à maior resistência à exposição aos esforços cíclicos, e ausência de fraturas — Figura 149 (d) —, demonstram a flexibilidade e elasticidade do PETG frente ao PLA.

O módulo de perda ( $E''$ ), conforme descrito anteriormente, está relacionado a um processo de dissipação de energia. A transição vítrea de um material pode ser entendida como uma queda abrupta no módulo de armazenamento ( $E'$ ), em conjunto com os máximos de  $E''$  e  $\tan(\delta)$  em função da temperatura. O pico máximo do módulo de perda, em uma relação  $E'' \times T$  (onde  $T$  é a temperatura), consiste em uma situação de máxima dissipação de energia mecânica, a qual corresponde a uma mudança no estado vítreo para o elástico na região de transição vítrea (CASSU e FELISBERTI, 2005).

Segundo Sepe (1998), o módulo de perda consiste na contribuição da componente viscosa no polímero, ou seja, a porção do material que irá fluir sob condições de tensão. Em termos de engenharia, esse comportamento é observado na fluência (fluxo a frio) ou no relaxamento das tensões, dependendo se a aplicação envolve tensão ou deformação constantes. De acordo com o autor, um aumento rápido no módulo de perda indica um crescimento na mobilidade estrutural do polímero, um processo de relaxamento que permite o movimento ao longo de maiores

porções da cadeia polimérica individual do que seria possível abaixo da temperatura de transição vítrea.

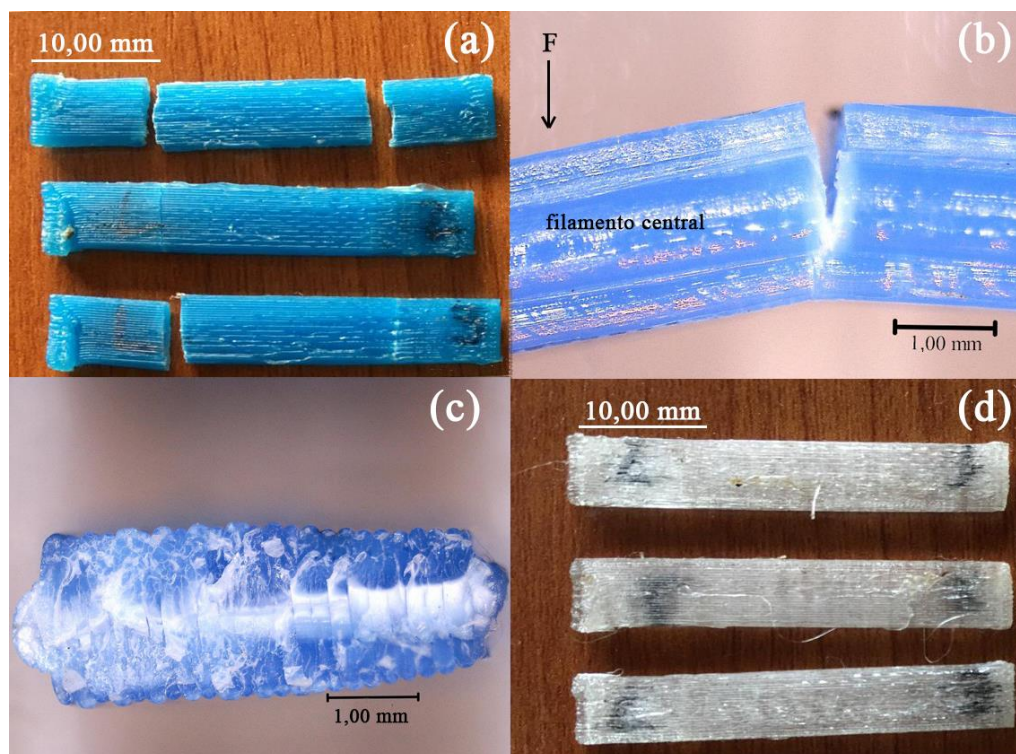


Figura 149 – Amostra em PLA fraturadas (a), direção da fratura (b), seção transversal (c) e amostras em PETG (d).

Com base nos conceitos apresentados pelos autores, um pico  $E''$  está relacionado a uma mudança no comportamento do material. Nesta investigação, os experimentos foram conduzidos em uma condição isotérmica — diferentemente dos estudos com DMA utilizados, por exemplo, para identificar a  $T_g$  dos materiais, nos quais há variação de temperatura — e, assim, os picos no módulo de perda, Figuras 147 e 148, podem ser interpretados como uma mudança nas peças em PLA e PETG causadas por fraturas (especificamente no PLA) ou por deformações plásticas nos filamentos depositados.

Os picos de maior dissipação de energia nos materiais analisados neste estudo ocorrem em momentos (ao longo do tempo) diferentes. No PLA o valor máximo de  $E''$  é identificado logo nos instantes iniciais do ensaio de DMA — por volta de 5 min, conforme o gráfico da Figura 147 —, enquanto que no PETG este efeito só foi identificado aos 24 min (Figura 148), isto é, próximo do termino do teste. Comparativamente, com base nos valores médios dos máximos de  $E''$  (Tabela 42), o PLA ( $E''_{\text{médio}} \approx 60,77$  MPa) dissipou, no pico, aproximadamente 2,5 vezes mais energia que o PETG ( $E''_{\text{médio}} \approx 24,18$  MPa). A magnitude do pico de  $E''$  deve-



se a um processo danoso mais significativo, tal como o rompimento conjunto de uma série de filamentos depositados, do que a um mecanismo natural de perda de propriedades mecânicas, como o que possivelmente atuou nos elementos em PETG.

A característica de maior dissipação de energia do PLA pode ser constatada também pelos valores de  $\tan(\delta)$  apresentados pelo material, de aproximadamente 0,05 no início do experimento, e 0,07 no pico. No PETG, os valores transitam entre 0,02 no início do ensaio e 0,03 máximo (Tabela 42). De acordo com a literatura, o fator de perda  $\tan(\delta)$  permite avaliar a diferença entre as partes elástica e viscosa do material. Quanto mais intenso o pico de  $\tan(\delta)$ , maior será a diferença entre as partes, indicando assim um material no qual a componente viscosa predomina à elástica (LORANDI *et al.*, 2016); em outras palavras, quanto maior o valor, mais o material dissipa a energia utilizada para deformá-lo (CANEVAROLO, 2004). A avaliação dos valores máximos do módulo de perda e de  $\tan(\delta)$  colabora com as discussões anteriores sobre a maior capacidade elástica do PETG, em peças impressas com a configuração (1), em relação ao PLA.

Os valores de  $\tan(\delta)$ , obtidos com os testes de DMA das peças em PLA e PETG impressas na configuração (1), foram comparados também com os de outros materiais<sup>57</sup>, a partir de informações disponíveis na base de dados do *software CES EduPack 2018*<sup>®</sup> (CES, 2018). A análise foi realizada confrontando o fator de perda com a “energia elástica armazenada (molas) ( $\text{kJ/m}^3$ )”<sup>58</sup> dos materiais. Relativamente à última propriedade citada, o PLA impresso apresentou valores médios em torno de  $338,80 \text{ kJ/m}^3$ , enquanto o PETG aproximadamente  $440,43 \text{ kJ/m}^3$ , dados estes obtidos com os resultados dos ensaios de tração da seção 3.4.

Em um primeiro momento, o PLA e o PETG foram contrapostos a “materiais críticos”, metais utilizados para confeccionar molas, polímeros e elastômeros, Figura 150. Os “materiais críticos” foram selecionados como pontos extremos e combinam menor energia elástica armazenada com maior  $\tan(\delta)$  (concreto asfáltico) e maior energia elástica armazenada com menor fator de perda (Sílica, 25-23 *microns monofilament*, f).

<sup>57</sup> Os valores reportados no software são para uma condição de ensaio em temperatura ambiente e com frequência de 1Hz (CES, 2018).

<sup>58</sup> Mede a energia elástica que o material consegue armazenar quando carregado. É definida como: energia elástica armazenada (mola) =  $0,5 * ((\text{tensão limite de elasticidade}^2) / \text{módulo de Young})$ . Valores elevados indicam que o material pode armazenar maiores níveis de energia elástica sem escoar, e portanto, são melhores para molas (ASHBY *et al.*, 2018 *apud* CES, 2018). **Todos os valores de energia elástica armazenada (mola) e  $\tan(\delta)$ , com exceção dos obtidos experimentalmente para o PLA e o PETG impressos, são de propriedade do CES (2018).**

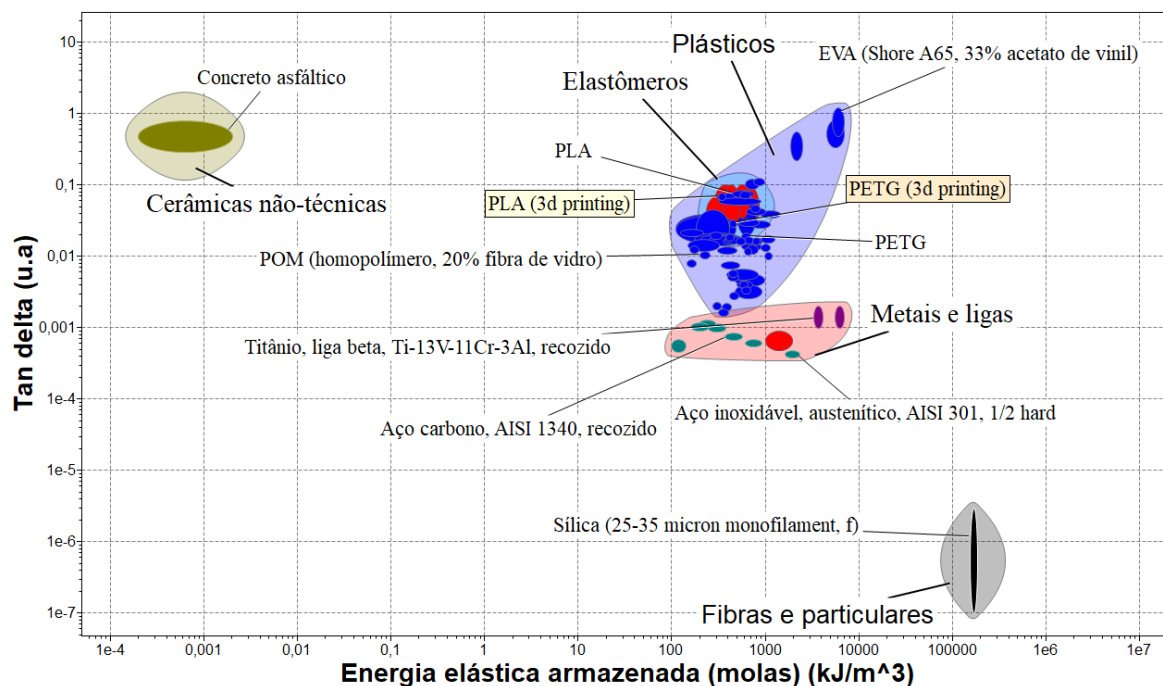


Figura 150 – Comparação entre os valores de  $\tan(\delta)$  do PLA e do PETG impressos com outros materiais da plataforma CES Edupack 2018® (CES, 2018).

Com base nos resultados da Figura 150, é possível verificar que os materiais analisados neste estudo, em destaque na imagem acima, encontram-se situados entre os pontos extremos, com valores consideravelmente distantes do material com maior dissipação de energia, concreto asfáltico —  $\tan(\delta)$  entre 0,3 e 0,8 e energia elástica armazenada (mola) entre  $(2,0 \times 10^{-4}$  e  $0,002)$   $\text{kJ/m}^3$  —, e do com maior potencial elástico (Sílica, 25-23 *microns monofilament, f*) —  $\tan(\delta)$  entre  $1,0 \times 10^{-7}$  e  $3,0 \times 10^{-6}$  e energia elástica armazenada (mola) entre  $(1,65 \times 10^5$  e  $1,71 \times 10^5)$   $\text{kJ/m}^3$ . Este último material apresenta um comportamento muito próximo ao de um sistema perfeitamente elástico, que segundo Canevarolo (2004) seria com  $\tan(\delta)$  igual a 0.

O PETG, inclusive, destaca-se por apresentar maior valor de energia armazenada ( $440,43 \text{ kJ/m}^3$ ) e  $\tan(\delta)$  (0,03) semelhante aos de polímeros utilizados para confeccionar molas, como o Polioximetileno (Poliacetil) (POM, homopolímero, 20% fibra de vidro) — (202 a 250)  $\text{kJ/m}^3$  e  $\tan(\delta)$  entre 0,0104 e 0,0111. A energia elástica armazenada (mola) do PETG impresso encontra-se também dentro do intervalo desta propriedade para alguns metais utilizados para molas, tal como o aço carbono (AISI 1340), com valores de  $370 \text{ kJ/m}^3$  a  $562 \text{ kJ/m}^3$ . A diferença entre o metal e o PETG impresso está na dissipação de energia, sendo que o polímero, no caso, dissipa mais do que o aço ( $\tan(\delta)$  entre  $6,8 \times 10^{-4}$  e  $8,5 \times 10^{-4}$ ).

A causa para o contraste provavelmente está relacionada às características inerentes do processo de Impressão 3D por extrusão (vazios, linhas de adesão entre e dentro das camadas),

que são possíveis pontos de falhas, ou seja, elementos que contribuem para a perda de energia mecânica. Essa constatação fica mais evidente quando são verificados os valores, disponibilizados pelo *software*, de energia elástica armazenada (mola) e  $\tan(\delta)$  para um PETG sem influência do processo: 557 kJ/m<sup>3</sup> a 680 kJ/m<sup>3</sup> e 0,0190 a 0,0199.

No caso do PLA impresso, mesmo apresentando valores de energia armazenada de 338,80 kJ/m<sup>3</sup>, isto é, superior ou dentro dos intervalos apresentados anteriormente, o material é limitado pelo alto fator de perda (0,07) quando comparado ao POM e ao aço carbono utilizado na fabricação de molas. Ao ser confrontado com propriedades “naturais” do PLA — energia elástica armazenada (mola) entre 445 kJ/m<sup>3</sup> e 742 kJ/m<sup>3</sup>, e  $\tan(\delta)$  entre 0,0747 e 0,0793 —, é possível verificar que as influências do processo de Impressão 3D atuam sobre a energia armazenada, mas não totalmente sobre o fator de perda, sendo esta uma característica do material transferida para as peças, independentemente da técnica de fabricação.

Em um segundo momento, foram analisados na plataforma *CES EduPack 2018*<sup>®</sup>, através do mecanismo de pesquisa do *software*, materiais poliméricos utilizados para a fabricação de conexões *snap-fit*, em função dos aspectos “energia elástica armazenada (mola)” e  $\tan(\delta)$ , utilizados anteriormente. Tais materiais foram então confrontados com os resultados obtidos para o PLA e o PETG, a partir de peças impressas na configuração (1), e com a propriedades dos mesmos, sem a influência do processo de Impressão 3D (Figura 151).

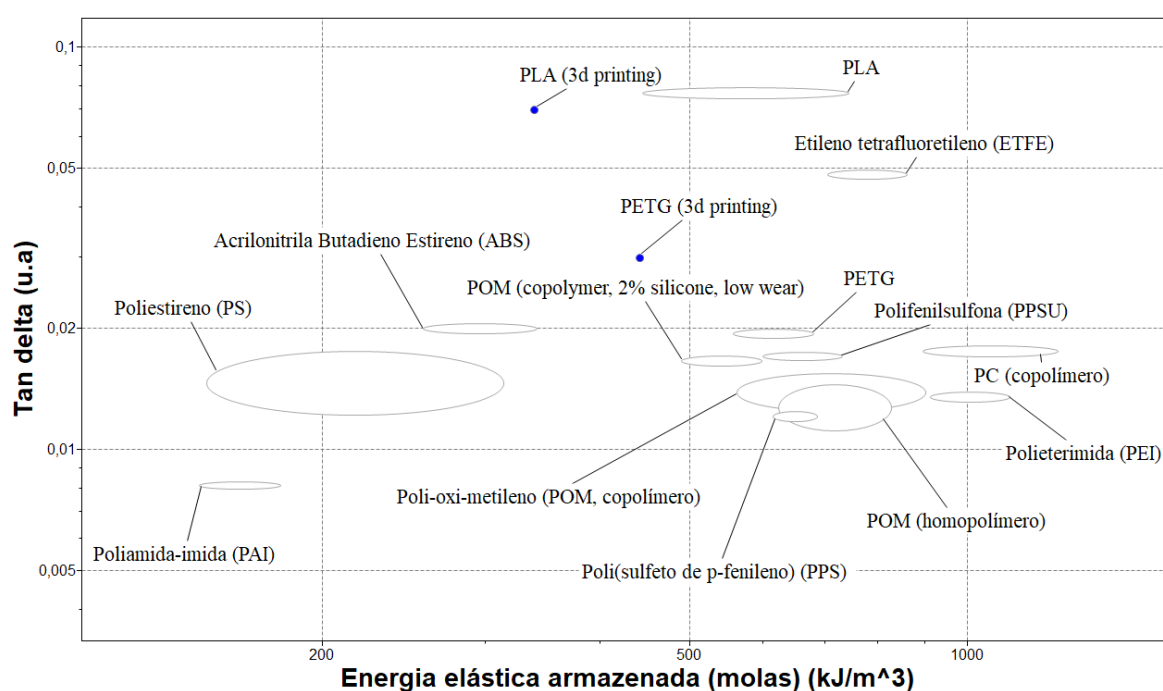


Figura 151 – Materiais utilizados para *snap-fits* (CES,2018) versus PLA e PETG impressos.



Os resultados apresentados no gráfico da Figura 151 mostram que o PETG impresso se encontra mais próximo, quando comparado ao PLA na mesma configuração, aos polímeros utilizados na confecção de *snap-fits*. Considerando apenas as propriedades do material não impresso — com base nas referências do PETG da base de dados do *software* (CES, 2018) —, o comportamento do polímero é semelhante ao de materiais como POM e PPSU. O PLA, por sua vez, impresso ou não, distancia-se dos principais polímeros utilizados para tal aplicação, tendo mais proximidade com o Etileno tetrafluoretileno (ETFE). Informações da própria plataforma de dados definem o ETFE como um material capaz de ser utilizado para a produção de *snap-fits*, porém com baixas deformações, devido a sua baixa ductilidade (CES, 2018).

Nas Figuras 152 e 153 são apresentadas as curvas para as amostras fabricadas com a configuração de impressão (2) e com os maiores valores para resposta, para o PLA e o PETG. Em síntese, ambos os materiais demonstraram um comportamento de alta dissipação de energia, como pode ser observado nos picos do fator de perda dos gráficos do PLA ( $\tan(\delta) = 0,221$ ) e do PETG ( $\tan(\delta) = 0,121$ ). Tal efeito já era esperado, uma vez que as peças foram impressas na condição mais crítica, isto é, na vertical e, portanto, com as linhas de adesão entre camadas (região de baixa resistência mecânica) direcionadas à aplicação dos esforços durante o teste.

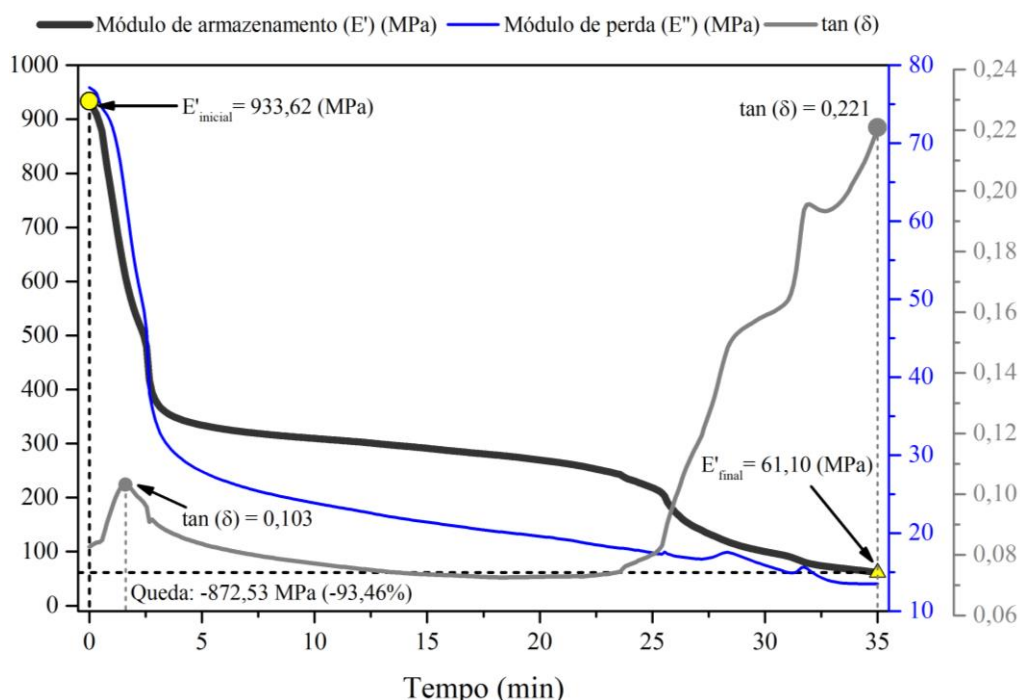


Figura 152 – Comportamento de  $E'$ ,  $E''$  e  $\tan(\delta)$  ao longo do tempo, amostra em PLA configuração (2).

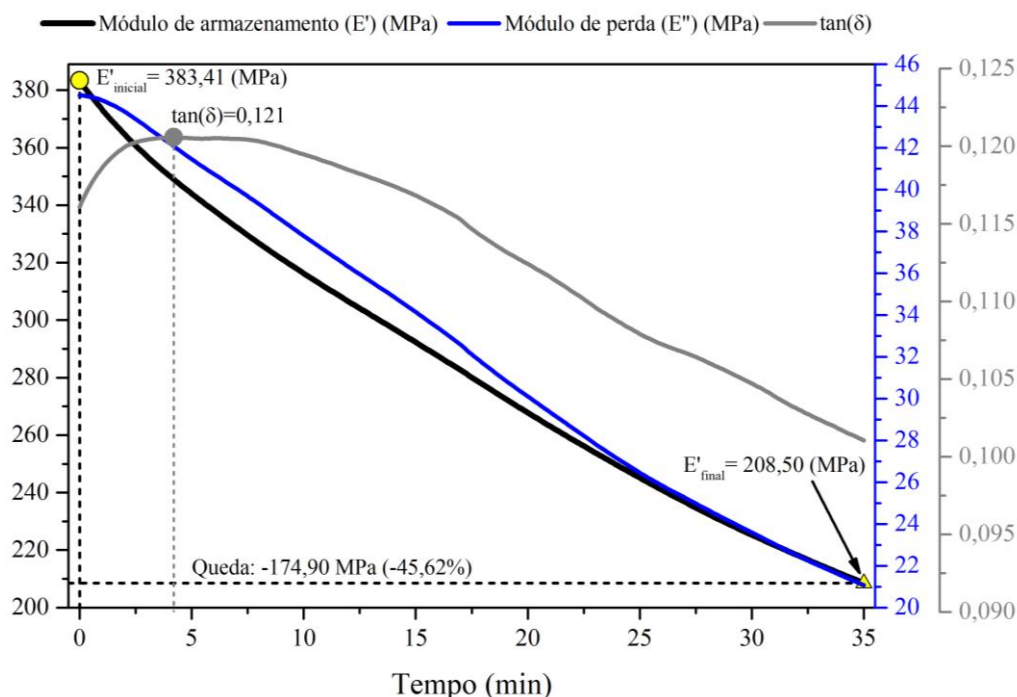


Figura 153 – Comportamento de  $E'$ ,  $E''$  e  $\tan(\delta)$  ao longo do tempo, amostra em PETG configuração (2).

Comparando os valores de  $\tan(\delta)$  obtidos experimentalmente, Figuras 152 e 153, nas peças na vertical em PLA e PETG, com os valores de referência para estes materiais disponíveis no *CES EduPack*<sup>®</sup> — PLA entre 0,0747 e 0,0793 e PETG de 0,019 a 0,0199 —, é possível verificar um crescimento na diferença de praticamente o dobro no PLA e de 6 vezes no PETG. Nas peças fabricadas na configuração (1), considerando os valores máximos das Figuras 147 e 148, esta variação foi de 1,4 vez maior no PETG, e 0,80 vez menor no PLA. A configuração unidirecional é então capaz de se aproximar das características naturais do material, enquanto a configuração vertical sobrepõe as propriedades dos mesmos. O fator de perda das peças impressas na configuração (2), é por exemplo, semelhante ao de materiais como: espumas, couro, gesso, papel, balsa, entre outros, conforme mostrado na Figura 154.

Apesar da maior dissipação de energia apresentada por ambos os materiais, decorrente da estratégia de construção, diferenças entre o PLA e o PETG foram observadas. Assim como na configuração (1), as peças em PLA sofreram fraturas (Figura 155), cujos picos em  $\tan(\delta)$  (Figura 152) podem estar relacionados. No PETG, embora com uma maior perda de energia — possivelmente relacionada a pequenos desprendimentos entre camadas — no início do teste, quando comparado aos resultados da primeira condição de impressão, não foram identificadas grandes avarias nas amostras. Inclusive, após o valor máximo de  $\tan(\delta)$  (Figura 153), uma queda na magnitude desse fator é observada nos momentos finais do ensaio, indicando uma provável estabilização, ou redução, dos movimentos das cadeias poliméricas do material.

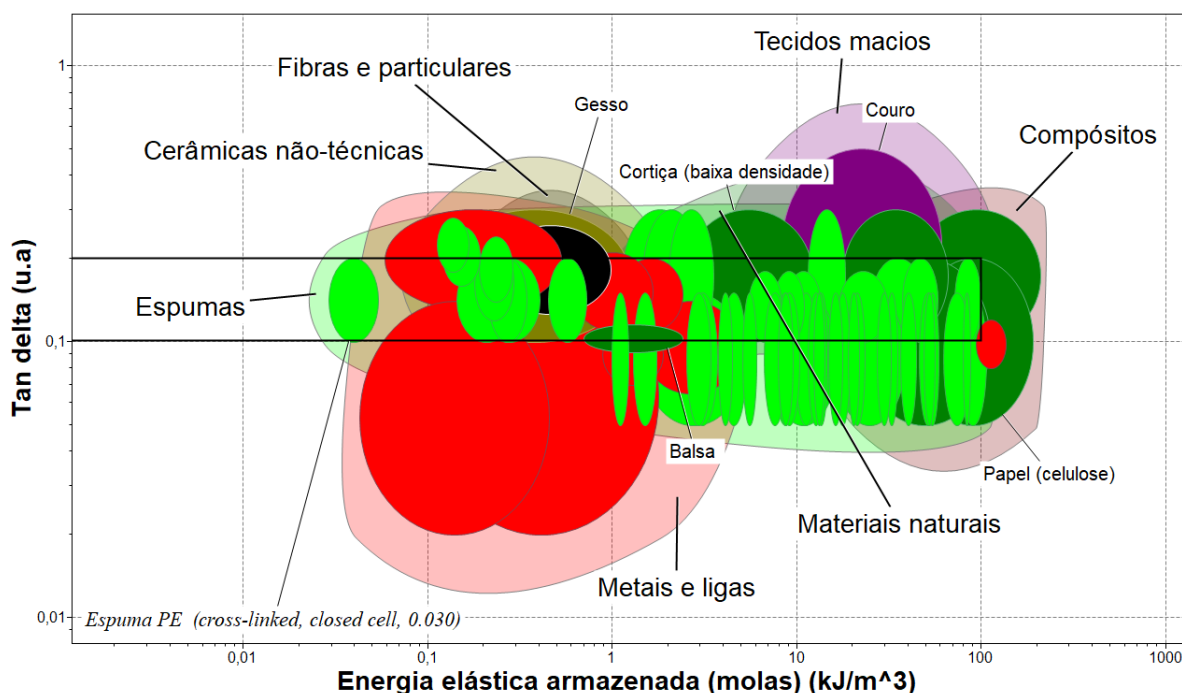


Figura 154 – Materiais com valores de  $\tan(\delta)$  (CES,2018) próximos aos dos polímeros impressos com a configuração (2).

Outro aspecto que mostra a superioridade do PETG em relação ao PLA é que, mesmo na condição crítica de impressão, o material apresentou maior potencial elástico. A variação no módulo de armazenamento do PETG, considerando a amostra do gráfico da Figura 153, foi de aproximadamente -45,62%, enquanto que na peça em PLA (Figura 152) foi verificada uma perda quase que total da propriedade, isto é, um decréscimo de -93,46% de  $E'$ .

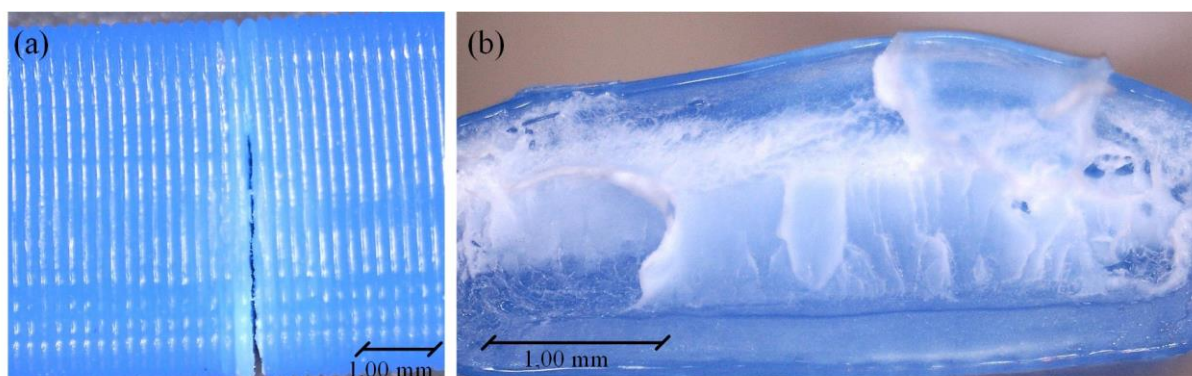


Figura 155 – Fratura amostra vertical em PLA, (a) topo e (b) secção transversal.

Para finalizar a exposição dos resultados da análise de DMA, na Figura 156 é demonstrado o comportamento de relaxamento das tensões, ao longo do tempo, para amostras em PLA e PETG fabricadas com as configurações de impressão (1) (a) e (2) (b).

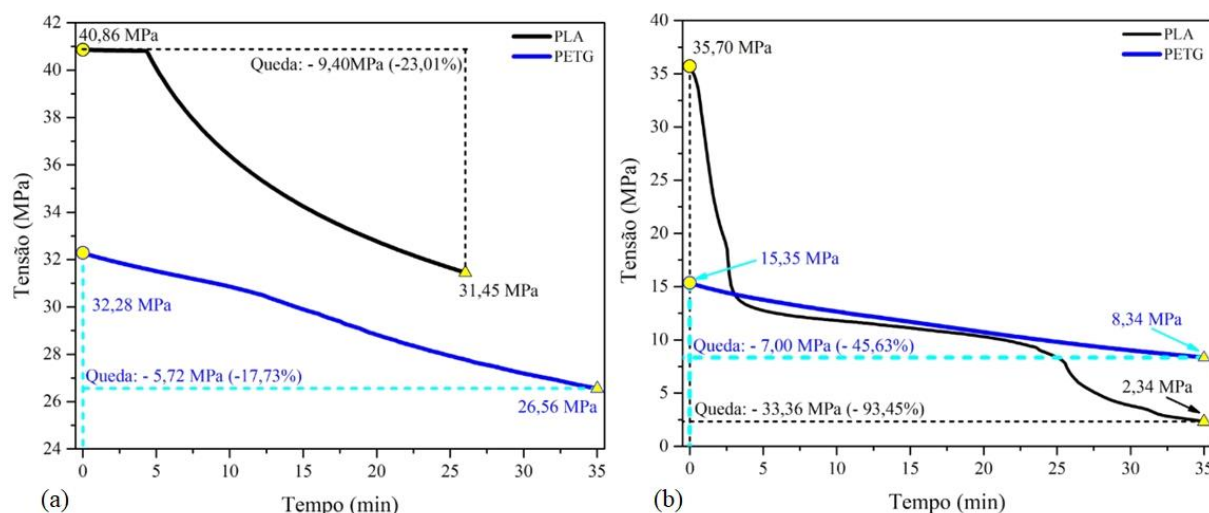


Figura 156 – Relaxamento das tensões das amostras fabricadas com as configurações (1) (a) e (2) (b).

Seguindo a tendência das discussões anteriores, o PETG foi o material, em ambos os cenários de construção, com a menor variação das tensões necessárias para gerar uma deflexão de 2 mm. Em especial, o comportamento demonstrado pelo material com as peças na configuração de impressão (1), com variações de tensão de aproximadamente -5,72 MPa, é um indicativo da maior capacidade deste para aplicação na confecção de conexões *snap-fit* impressas. Um menor relaxamento de tensões significa que as peças em PETG gerariam conexões com maior eficiência para manter a integridade dos encaixes, isto é, preservar o máximo possível a força necessária para garantir as deformações em operação (manter o aperto e evitar o afrouxamento). Em oposição ao PETG, o PLA, de acordo com os resultados da Figura 156 (a) e (b), poderia gerar conexões com probabilidade de sofrerem quebras ou perdas significativas na força de fixação durante ou após a aplicação de esforços cíclicos.

## (II) Medição da força de inserção

Terminadas as discussões sobre a análise de DMA, na Tabela 43 é apresentada a força de inserção média por ciclo, para os três conjuntos em cada uma das configurações de impressão (1 e 2) e materiais.

Tabela 43 – Força de inserção média por ciclos para as conexões *snap-fit* em PLA e PETG.

Ciclos	PLA		PETG	
	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 1	Configuração 2
1	24,50 ± 2,65	16,67 ± 4,6	13,17 ± 1,04	8,00 ± 1,5
2	18,50 ± 1,50	*	10,50 ± 0,00	*
3	15,83 ± 2,25	*	9,83 ± 0,29	*
4	14,00 ± 1,00	*	9,50 ± 0,00	*
5	13,33 ± 0,76	*	9,33 ± 0,29	*
6	13,67 ± 1,26	*	9,33 ± 0,29	*
7	13,17 ± 0,58	*	9,33 ± 0,29	*
8	12,83 ± 0,76	*	9,17 ± 0,29	*
9	12,33 ± 0,58	*	9,00 ± 0,00	*
10	12,00 ± 0,00	*	8,83 ± 0,29	*

Ao se comparar os resultados da Tabela 43, considerando os elementos fabricados com a configuração de impressão (1), com os valores médios da força de inserção no primeiro ciclo de montagem do estudo com o módulo de baixo coeficiente de atrito em POM, é possível verificar um aumento significativo na resposta em ambos os materiais. A significância estatística foi obtida através de um teste de comparação de médias de *t-Student* (bicaudal, considerando variâncias iguais e nível de confiança de 95%)<sup>59</sup> (Tabela 44).

Tabela 44 – Teste de comparação de médias para força de inserção.

	PLA		PETG	
	Impresso/Impresso	Impresso/POM	Impresso/Impresso	Impresso/POM
Média	24,50	12,83	13,17	8,17
V	7,0	0,3	1,08	0,33
V <sub>agrupada</sub>	3,67		0,71	
gl	4		4	
t <sub>calculado</sub>	7,46		7,28	
P	0,002		0,002	
t <sub>tabelado</sub>	2,78		2,78	
Notas:				
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Impresso/Impresso: condição de interação entre superfícies impressas (macho e fêmea);</li> <li>○ Impresso/POM: estudo com o módulo de baixo coeficiente de atrito em Poliacetal;</li> <li>○ V (variância).</li> </ul>				

No PLA, a força de inserção média praticamente dobrou dos resultados do teste em baixo atrito para a condição de interação entre peças impressas (de 12,83N para 24,5N), gerando um crescimento na magnitude da resposta de aproximadamente +90,91%. Já no PETG, a variação foi em torno de +61,22%, isto é, de 8,17 N, na condição de menor atrito, para 13,17 N, na

<sup>59</sup> O teste realizado, baseado nos conceitos descritos por Levin *et al.* (2012), considerou as hipóteses nula (H0) como a igualdade entre as médias (H0:  $\mu_1 = \mu_2$ ), e alternativa (H1) como a diferença entre as médias (H1:  $\mu_1 \neq \mu_2$ ). Rejeitou-se a hipótese H0 quando:  $|t_{\text{calculado}}| > t_{\text{tabelado}}$ .

situação de contato entre superfícies impressas. Entre os materiais, a força de inserção média do PLA, considerando os valores para o primeiro ciclo de montagem do presente estudo, foi aproximadamente 86,08% maior que a do PETG.

Partindo do princípio de que os machos foram fabricados com a mesma configuração de impressão utilizada no estudo da seção 4.1 e, portanto, com propriedades mecânicas semelhantes, as variações na força de inserção podem estar relacionadas à interação com as diferentes partes fêmeas utilizadas, em dois aspectos: (i) condições de atrito e (ii) variações dimensionais. Uma vez que a força de inserção, segundo Sawyer *et al.* (1997), é fortemente influenciada pelo coeficiente de atrito, os menores valores identificados no primeiro estudo podem estar relacionados a um conjunto de fatores que reduziu a oposição ao movimento entre as superfícies em contato, tais como: (i) fêmea fabricada em Poliacetal (POM), material conhecido por apresentar baixo coeficiente de atrito e característica de auto lubrificação (DUPONT, 2015; JARVIS, 2017; MURO FRAGUAS *et al.*, 2018); (ii) o contato ocorrer entre materiais diferentes (PLA e POM, PETG e POM); e (iii) a diferença entre o acabamento das superfícies, pois a parte fêmea foi confeccionada por processo de usinagem e os machos por Impressão 3D. A qualidade das superfícies, oriunda das diferentes tecnologias de fabricação, altera a afinidade entre as mesmas, dado que diferentes padrões de rugosidades foram gerados.

No presente estudo, porém, as condições de interação entre superfícies foram mais críticas, uma vez que o contato ocorreu entre partes fabricadas como o mesmo material (PLA|PLA e PETG|PETG), o que segundo Izadian (2015) aumenta o atrito e, portanto, neste caso estudado, a força de inserção também. A relação entre o atrito e a força de montagem, nas diferentes situações avaliadas, pode ser observada ao se analisar as curvas de força por deslocamento, durante o movimento de encaixe — Figura 157 (a) e (b).

Em ambas as situações, no contato com a fêmea em POM ou com o mesmo material do macho, constatou-se que a força tende a variar em picos ao longo do deslocamento, ora aumentando ora aliviando, até atingir o valor máximo, o que pode estar relacionado a maiores ou menores efeitos de resistência entre as partes. A diferença entre as situações analisadas é que na condição de interação entre superfícies impressas os picos são mais acentuados, apresentando maiores intensidades momentos antes e após o valor máximo da força de inserção.

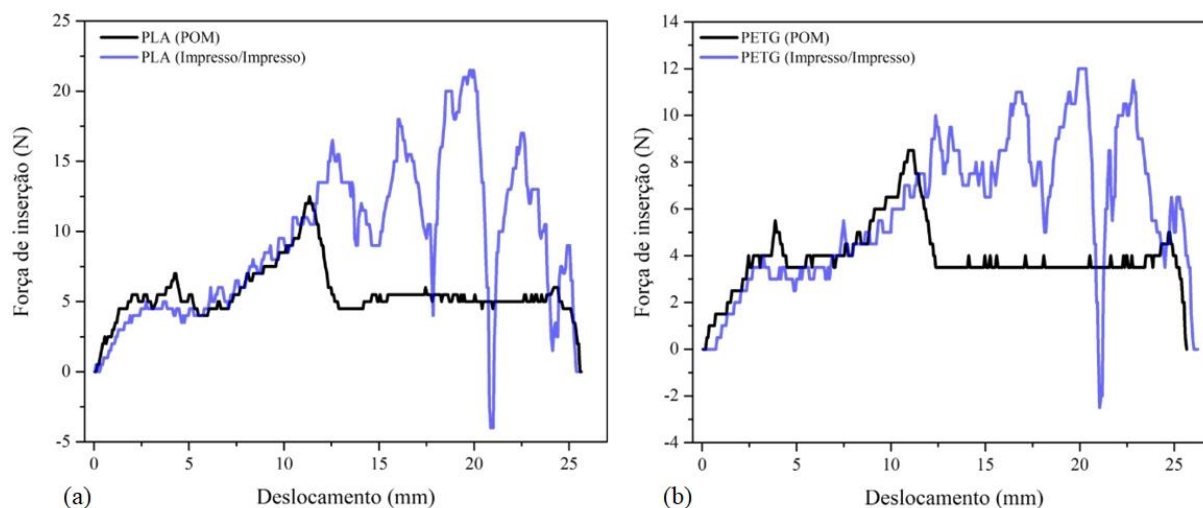


Figura 157 – Efeitos do atrito no processo de montagem dos *snap-fits* em diferentes superfícies, (a) PLA e (b) PETG.

O comportamento apresentado na Figura 157 (a) e (b) assemelha-se ao que na literatura é chamado de *stick-slip*. O efeito consiste na intermitência em um movimento devido à diferença entre o coeficiente de atrito estático e cinético (DO VALE, 2014). A maior parte dos exemplos na física demonstram o atrito em sistema com deslizamento constante. Um bloco em repouso, ao iniciar um deslizamento ao longo de um plano inclinado, adquire velocidade e força de atrito constantes — Figura 158 (1). Em sistemas *stick-slip*, porém, o movimento relativo entre duas superfícies é cíclico, resultando em uma força de atrito com perfil “dente de serra” — Figura 158 (2) (PERSSON, 2000; PATEK e BAIO, 2007).

Além do perfil das curvas da Figura 157 (a) e (b), outro indicativo de que o efeito similar ao *stick-slip* pode ter atuado nos experimentos realizados neste estudo é o fato que trabalhos como o de Suri (2002), no âmbito dos *snap-fits*, também o mencionam. Analisando os valores teóricos da força de inserção — 25,76 N para o PLA e 13,24 N para o PETG (Tabela 41) —, calculados a partir dos estudos práticos de caracterização mecânica e das superfícies de peças impressas (seções 3.4 e 3.5), é possível observar uma proximidade com os resultados médios, verificados na medição da força no primeiro ciclo de montagem, 24,50 N (PLA) e 13,17 N (PETG). Uma vez que nesta tese foi medido o coeficiente de atrito estático, a semelhança entre as forças teóricas e experimentais pode apontar para uma maior atuação do atrito estático no processo de montagem dos *snap-fits* impressos.



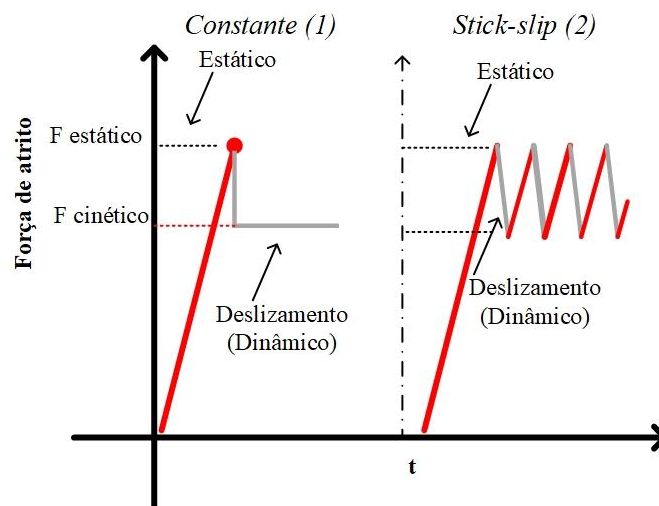


Figura 158 – Efeito *stick-slip* (adaptado de PERSSON, 2000; PATEK e BAIO, 2007; GUSTAFSSON, 2013).

Relativamente ao aspecto dimensional<sup>60</sup>, a fêmea (módulo de teste) fabricada em Poliacetal pelo processo de usinagem apresentou dimensões internas — (26,98 x 4,23) mm — próximas, ou maiores, aos valores nominais projetados — (27,00 x 4,00) mm, Figura 138 (a). Tal condição garantiu um espaço interno com folgas suficientes para oferecer aos machos impressos maior liberdade durante o processo de encaixe, evitando, portanto, que as peças fossem submetidas a maiores deformações, contribuindo para a redução da força de inserção. Especialmente nas fêmeas impressas em PLA, observou-se uma redução das dimensões internas, principalmente na direção crítica de encaixe (largura), de 27 mm (nominal) para 25,80 mm, o que praticamente eliminou as folgas de 0,5 mm planejadas para facilitar o encaixe e a acomodação dos machos, aumentando assim a resistência ao processo de montagem e a força de inserção. No PETG, entretanto, as dimensões das peças se aproximaram das medidas teóricas, com valores de (26,87 x 4,00) mm. Logo, o efeito da variação dimensional sobre a força pode não ter sido influente.

Por fim, confrontando os valores médios da força de inserção no primeiro ciclo das peças construídas com a configuração (1) (Tabela 43), na condição de interação entre superfícies impressas, com a força teórica para um conjunto *snap-fit* injetado (Tabela 41), é possível verificar uma diferença, mais suave no PETG ( $\approx +19\%$ ) e acentuada no PLA ( $\approx +40\%$ ), no sentido de crescimento da magnitude da resposta. Tal diferença pode estar relacionada à maior

<sup>60</sup> As fêmeas em PLA e PETG fabricadas pelo processo de Impressão 3D, em um total de um exemplar por material, foram avaliadas dimensionalmente em um equipamento *Bruker SkyScan Micro-CT 1174*, utilizando uma resolução de 14 $\mu$ m. Os ensaios foram realizados no Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto (CDRSP), do Instituto Politécnico de Leiria. Já o módulo em POM foi avaliado com o mesmo equipamento utilizado para a medição dos machos na seção 4.1.



rigidez das peças impressas frente as injetadas, em ambos os materiais, conforme observado no estudo da seção 3.4. Naquela ocasião, a distinção entre os módulos de elasticidade foi associada à baixa capacidade de deformação dos elementos impressos, devido às peculiaridades induzidas pelo processo de Impressão 3D por extrusão (vazios e linhas de união), quando comparadas às injetadas.

A renitência a deformações, natural dos componentes impressos, opõe-se a uma das principais ações associadas às conexões *snap-fit*, isto é, as deflexões. A dificuldade, em conjunto com as ações do atrito e as alterações das dimensões internas das fêmeas impressas, presente no cenário experimental colabora para o aumento da força de inserção nas conexões impressas. É importante destacar que no PLA impresso os efeitos da rigidez — componentes obtidos com a configuração unidirecional apresentaram um módulo de *Young* aproximadamente 34% maior que os injetados —, e de redução das dimensões da fêmea são mais acentuados, o que justifica a maior diferença entre os valores de força de montagem das conexões impressas com este material em relação ao modelo injetado teórico.

Concluídas as discussões sobre os fatores responsáveis pelo aumento da força de inserção nas conexões *snap-fit* impressas, nos gráficos da Figura 159 (a) (PLA) e (b) (PETG) é apresentado o comportamento da força de montagem ao longo de dez ciclos.

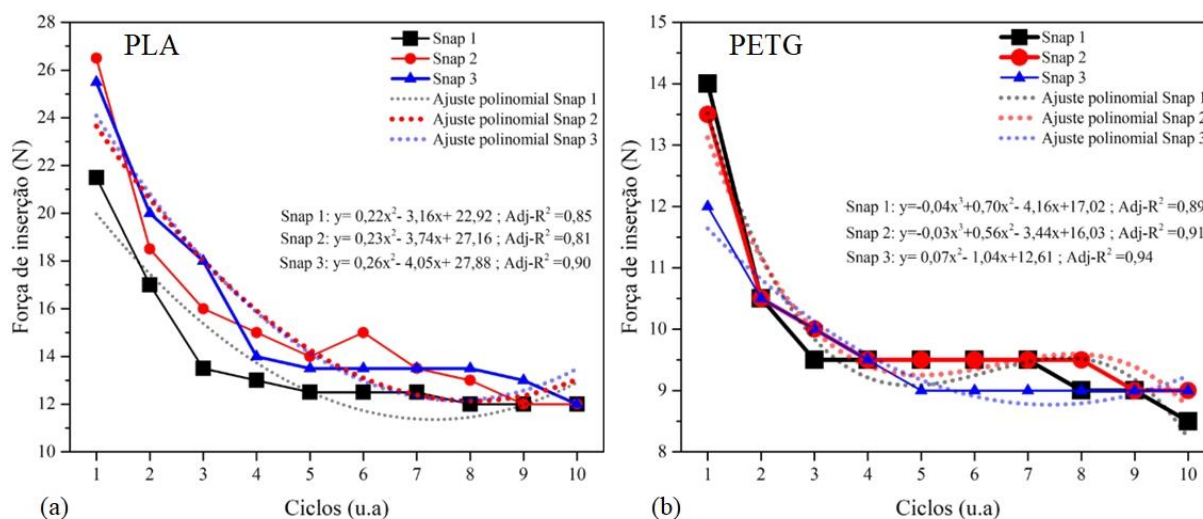


Figura 159 – Força de inserção em dez ciclos de montagem, (a) PLA e (b) PETG, configuração (1).

Assim como no estudo com baixo atrito, nesta etapa também foram identificadas quedas na força de inserção do primeiro para o último ciclo de montagem, em todos os machos fabricados em PLA e PETG. A redução da resposta variou em percentuais de -39,3%, -33,3% e -25%, respectivamente, para as peças 1, 2 e 3 em PETG. No PLA foram identificados maiores

valores de queda da força, para os três componentes, na ordem de -44,2%, -54,7% e -52,9%. Deixa assim de existir a semelhança na variação total da força de inserção (considerando os valores máximos e mínimos da resposta), observada no estudo com a fêmea em POM. O cenário é comprovado através do método de comparação de médias de *t-Student* (Tabela 45), o qual confrontou os valores percentuais da queda, entre ambos os materiais, no primeiro e no atual estudo de medição da força de inserção.

Tabela 45 – Comparação das médias da queda percentual da força de inserção entre PETG e PLA.

	<i>Impresso/POM (PETG)</i>	<i>Impresso/POM (PLA)</i>	<i>Impresso/Impresso (PETG)</i>	<i>Impresso/Impresso (PLA)</i>
Média	-27,80	-28,44	-32,54	-50,61
V	25,23	21,93	51,49	31,78
V <sub>agrupada</sub>	23,58		41,64	
gl	4		4	
t <sub>calculado</sub>	0,16		3,43	
P	0,88		0,03	
t <sub>tabelado</sub>	2,78		2,78	

Em seguida, comparou-se as médias da queda percentual da força de inserção para um mesmo material, porém, variando as circunstâncias de ensaio de medição (Tabela 46).

Tabela 46 – Comparação das médias da queda percentual da força de inserção entre condições de ensaio.

	<b>PLA</b>		<b>PETG</b>	
	<i>Impresso/Impresso</i>	<i>Impresso/POM</i>	<i>Impresso/Impresso</i>	<i>Impresso/POM</i>
Média	-50,61	-28,44	-32,54	-27,80
V	31,78	21,93	51,49	25,23
V <sub>agrupada</sub>	26,86		38,36	
gl	4		4	
t <sub>calculado</sub>	-5,24		-0,94	
P	0,01		0,40	
t <sub>tabelado</sub>	2,78		2,78	

Constatou-se, portanto, que no PLA há um crescimento significativo na perda da força do estudo com a fêmea em POM para a condição de interação entre superfícies impressas. A diferença, provavelmente, está relacionada ao agravamento dos padrões de falhas identificados no estudo anterior pela análise de tomografia, devido aos maiores esforços gerados neste estudo, decorrentes das condições de atrito e alterações dimensionais da fêmea impressa. É importante destacar também que foi realizado um teste de montagem completa, logo cargas manuais foram aplicadas para a desmontagem, colaborando para as variações na força de inserção.

Conforme verificado na análise de DMA, as peças em PLA impressas na configuração (1) apresentaram baixo potencial de armazenamento de energia, o que por si só já seria um fator considerável para a redução da força de inserção. No entanto, as condições adversas de interação entre peças impressas, mencionadas acima, potencializam a menor resistência cíclica do material e as falhas nas peças.

As consequências do efeito citado podem ser entendidas ao se correlacionar os resultados da medição da força de inserção com as respostas da análise dinâmica da seguinte forma: assumindo o tempo para a realização de uma montagem completa no primeiro ciclo de inserção, somado ao tempo até o pico máximo da força no segundo ciclo (gerando um total de 0,9 min), verificou-se uma queda na força de montagem de -21%. Para o mesmo intervalo temporal na análise de DMA (Figura 147), lembrando que o material é submetido a deflexões de 2 mm em dois sentidos (Figura 144) durante os testes, as perdas de energia são de apenas -3%.

No caso dos elementos em PETG, não houve diferença estatística entre as quedas percentuais médias na força de inserção dos machos entre os estudos com a fêmea em POM e a impressa. O comportamento deve-se à maior capacidade de armazenamento de energia e flexibilidade do material, em conjunto com o melhor desempenho dimensional da fêmea impressa. Por fim, além da menor redução na força de inserção, os componentes em PETG, assim como no estudo anterior, apresentaram maiores patamares de estabilização da resposta que o PLA — Figura 159 (a) e (b) —, demonstrando o melhor comportamento daquele polímero para aplicações cíclicas.

Os machos em PLA e PETG fabricados na configuração de impressão (2) (vertical) fraturaram logo no primeiro ciclo de inserção. Na Figura 160 (a) e (b) é apresentado o comportamento da força em função do deslocamento durante a montagem, respectivamente para um exemplar em PLA e outro em PETG.

Nos gráficos são observados dois picos pronunciados na força de inserção, o primeiro já nos instantes iniciais, associado à ruptura de umas das barras, e o segundo no máximo da deflexão antes do encaixe completo da barra restante. As fraturas ocorreram na zona do encastramento das barras, justamente por ser a região de maior concentração de esforços, Figura 161 (a) e (b).

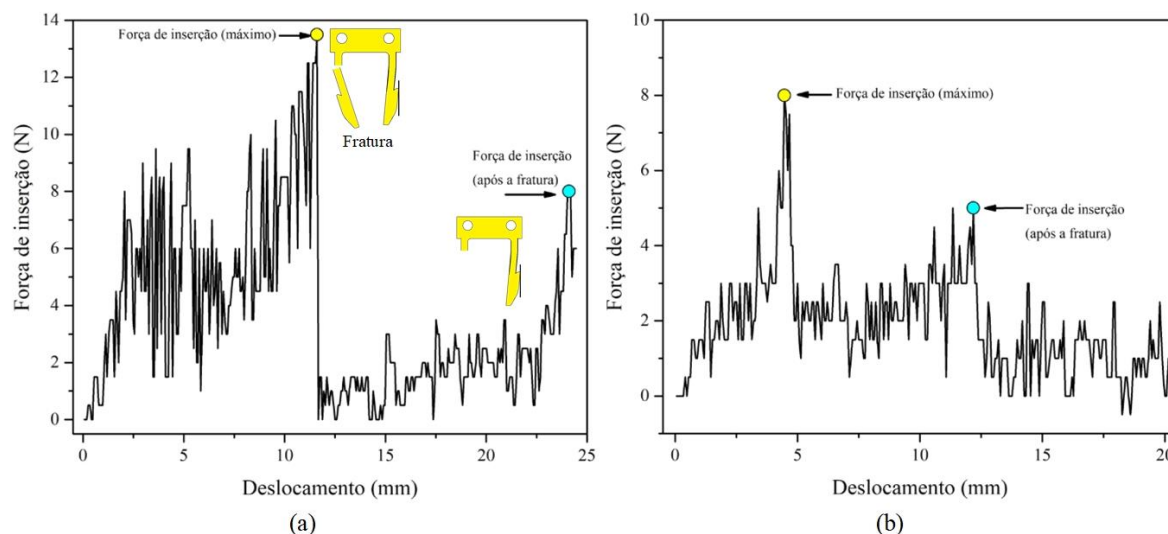


Figura 160 – Força de inserção versus deslocamento, amostras em PLA (a) e PETG (b) na configuração (2).

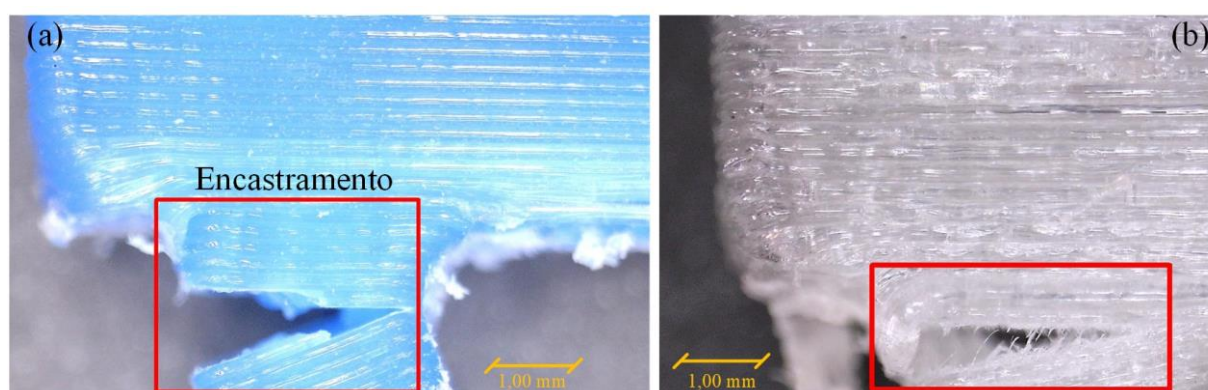


Figura 161 – Fratura nos machos impressos na vertical, (a) PLA e (b) PETG.

O desempenho negativo já era esperado, uma vez que se trata de uma configuração de construção crítica do ponto de vista mecânico, pois favorece a ação de cargas diretamente na linha de adesão entre camadas, que é conhecidamente uma das regiões mais fracas de peças fabricadas por Impressão 3D por extrusão. Experimentalmente, neste estudo constatou-se a performance mecânica inferior das peças fabricadas na orientação vertical, já que a análise de DMA demonstrou que estas são sistemas de maior dissipação de energia.

Entretanto, além da componente mecânica, outros fatores contribuíram para o mau funcionamento dos machos construídos com a configuração (2), sendo estes: (i) alterações de forma das peças, (ii) posicionamento e remoção das estruturas de suporte e (iii) atrito entre superfícies com filamentos a 90°. Relativamente ao primeiro fator, os machos construídos na vertical foram posicionados de forma que a extremidade das duas barras *cantilever*, especificamente a zona das presilhas, ficassem em contato com a plataforma de construção —

Figura 162 (1). Tal estratégia foi adotada para evitar o uso de suportes ou a ação da gravidade na distorção das estruturas depositadas em regiões críticas para o encaixe.

O planejamento de impressão dos machos, no entanto, gerou problemas durante a construção. A pequena área de contato entre o modelo e a base de impressão não foi suficiente para garantir uma fixação adequada da peça. Adicionalmente, o maior comprimento em Z e as seções transversais de pequenas dimensões das barras favoreceram um sistema com pouco equilíbrio. É importante informar que as barras correspondem à maior parcela dos machos e, portanto, do processo de impressão, sendo estas construídas individualmente grande parte do tempo.

O conjunto de fatores mencionados, combinado com os deslocamentos do bico na construção das camadas e de transição entre as barras, foi responsável por mover as partes durante a Impressão 3D — Figura 162 (2). Como resultado foram obtidos machos com barras em uma estrutura tipo “V”. Tal abertura na extremidade das peças, Figura 162 (3), conflitou com o processo de encaixe e com as possíveis reduções das dimensões internas das fêmeas, submetendo os materiais a maiores deformações e esforços, que aliados à fragilidade mecânica, conduziram a quebras.

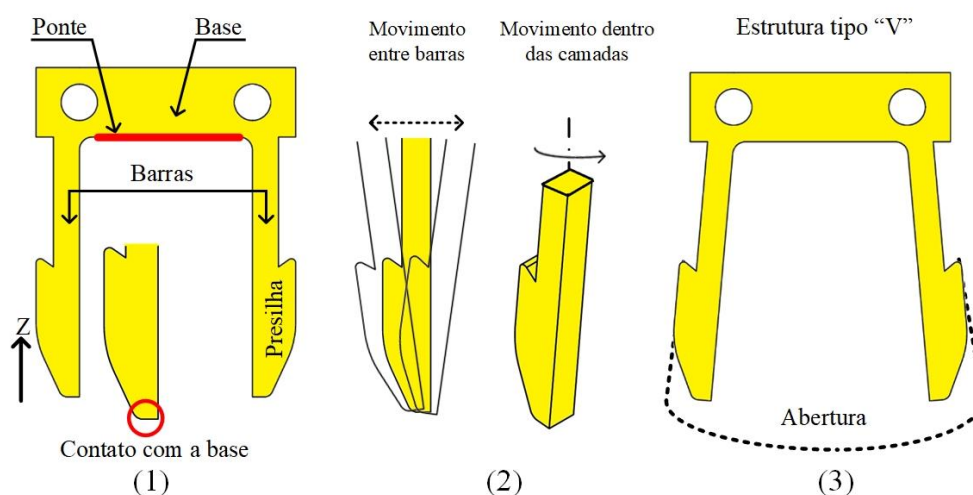


Figura 162 – Movimentação e variação de forma das peças impressas na vertical.

As fraturas apresentadas pelas peças caracterizaram-se como um erro sistemático, pois aconteceram no mesmo lugar e na mesma barra, Figura 163 (a). O comportamento pode estar relacionado à posição e à remoção das estruturas de suporte, que foram inseridas (no *software Meshmixer*<sup>®</sup>) na região de ponte entre as duas barras — Figura 162 (1). Porém, um dos pilares de sustentação ficou localizado no ponto de interface entre a barra e a base do conector macho,

especificamente sobre o raio de curvatura presente neste local — Figura 163 (b). A remoção dos suportes foi um processo manual, influenciado pela destreza do operador, realizado com o auxílio de um alicate de corte e dificultado pelo fato de o mesmo material de construção ter sido utilizado na confecção dos alicerces. A operação pode ter gerado esforços que fragilizaram a peças, justamente na parte de maior concentração de cargas, conduzindo à falha do componente.

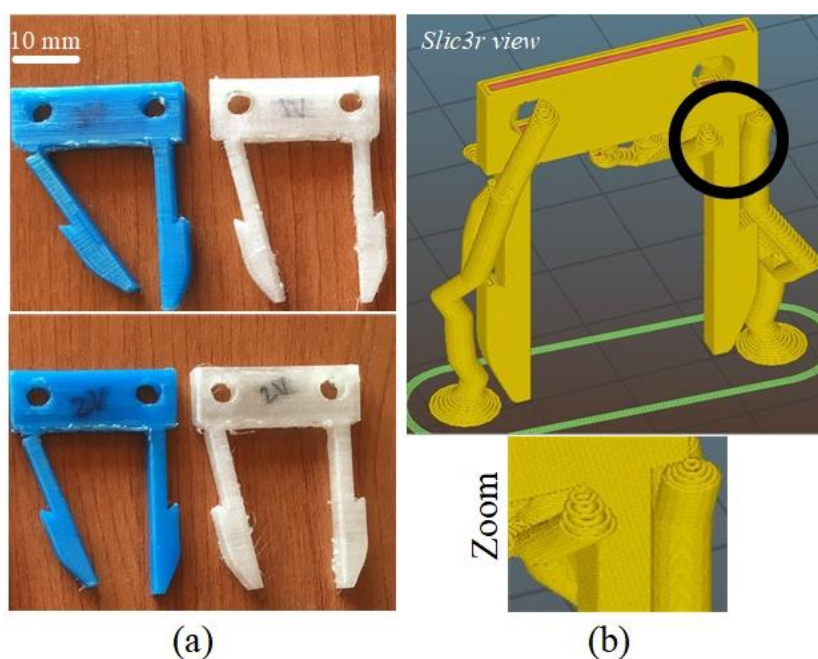


Figura 163 – Fratura padrão (a) e posição da estrutura de suporte (b).

O último fator que contribuiu para o fraco desempenho das peças na vertical foi o atrito. Conforme já estudado com os experimentos do plano inclinado, as condições de interação entre superfícies produzidas com o mesmo ângulo de deposição dos filamentos são as mais críticas, sendo a pior situação o contato entre partes com faces com filamentos em  $90^\circ$ , justamente o cenário presente nesta análise. A tendência de encaixe entre os picos e vales dos filamentos depositados de ambas as superfícies em movimento entre si dificulta o deslizamento, aumentando a resistências entre elas. Tal resistência é agravada também pelo contato entre materiais iguais. Um movimento oscilatório é gerado, uma vez que o encaixe e o desencaixe entre as superfícies é recorrente, isto é, uma conjuntura na qual as partes precisam sair do repouso — e, portanto, superar o atrito estático — e entrar em movimento constantemente. Esse comportamento é análogo ao efeito *stick-slip* mencionado anteriormente.

Sobre o efeito *stick-slip* na interação entre superfícies com filamentos em  $90^\circ$ , pelo perfil das curvas da Figura 160 (a) e (b) em comparação com as da Figura 157 (a) e (b), parece ter



sido mais intenso. Segundo Robinowicz (1965) *apud* Dong e Dapino (2014), uma das causas do *stick-slip* pode ser a ondulação das superfícies, o que pode ter ocorrido devido ao ângulo de deposição nas superfícies em 90°.

#### 4.2.1.2 Estudo de caso 2

Nesta etapa será comparado o desempenho dos *snap-fits*, em PLA e PETG, fabricados pelo processo de Impressão 3D por extrusão, na configuração (1) (unidirecional), através da análise da força de inserção, com os de sistemas produzidos pelas tecnologias SLS e *PolyJet*®. Não serão, contudo, aprofundadas as discussões sobre as possíveis causas para variação da força, em função das características dos processos e da estrutura das peças produzidas, nas conexões obtidas por tais sistemas de manufatura aditiva, já que as mesmas não são objetos desta tese. Os resultados dos testes de montagem completa com os componentes obtidos a partir de tais técnicas são apresentados na Figura 164 (a) e (b), respectivamente para SLS e *PolyJet*®.

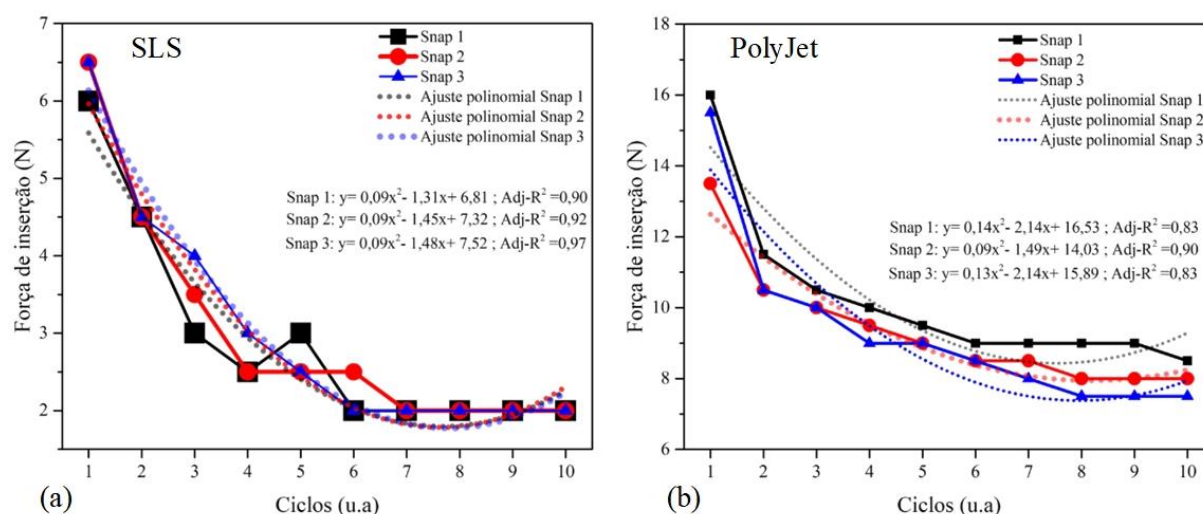


Figura 164 – Força de inserção em dez ciclos, (a) SLS e (b) *PolyJet*®.

As quedas percentuais na força de inserção, calculadas a partir do primeiro e do último valor de força, nos elementos em SLS foram de aproximadamente -66,7% para o macho 1, e -69,2%, igualmente, para as peças 2 e 3. Já nos componentes fabricados pela tecnologia *PolyJet*®, as variações apresentadas foram em torno de -46,9%, -40,7% e -51,6%.

O método da análise de variância (ANOVA,  $\alpha=95\%$ ) (Tabela 47) foi utilizado para comparar as médias (Figura 165) dos valores de redução percentual da força de inserção apresentados anteriormente com os obtidos nas peças em PLA e PETG, indicando a existência

de uma diferença significativa entre os grupos. Em seguida foi realizado um teste de *Scott-Knott* para identificar quais níveis diferenciavam-se entre si. As barras com as mesmas letras no gráfico da Figura 165 correspondem a médias iguais.

Tabela 47 – Comparação entre a redução percentual da força de inserção em todas as tecnologias (ANOVA).

Fonte de variação	gl	SQ	V	F	P
Entre grupos	3	1964,25	624,75	22,74	0,0003
Dentro dos grupos	8	230,36	28,80		
Total	11	2194,62			

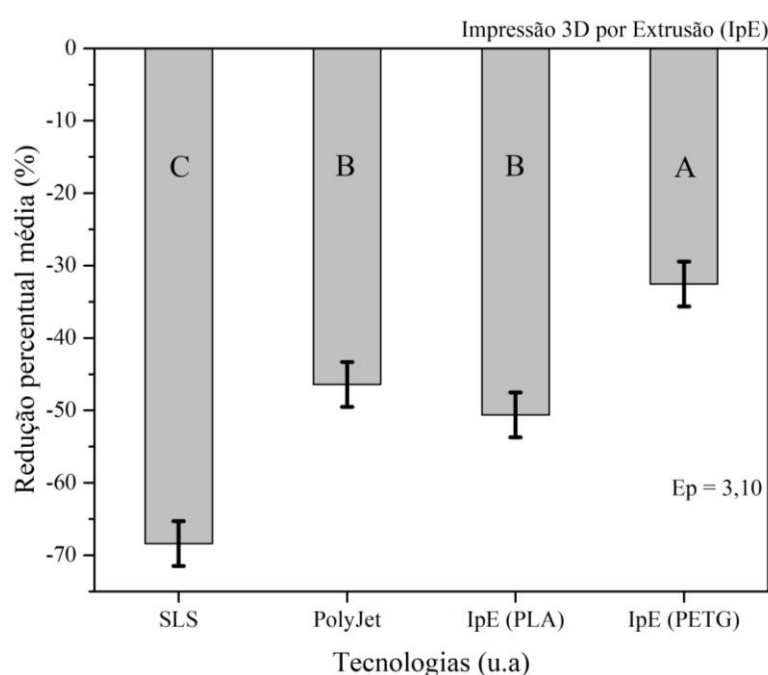


Figura 165 – Média da redução percentual da força de inserção por tecnologia de impressão.

A partir dos dados do tratamento estatístico, Figura 165, foi possível constatar que as peças em PETG, obtidas pelo processo de Impressão 3D por extrusão, caracterizaram-se pela situação de menor perda de força após a conclusão dos ensaios, seguida pelos elementos em PLA e *PolyJet*® (com igualdade estatística), e pela condição máxima de redução percentual, os *snap*s em SLS.

Apesar de no aspecto geral as peças em SLS disporem das maiores reduções na força de inserção, ao se analisar o comportamento ciclo a ciclo — Figura 164 (a) — da resposta, é possível verificar que após as quedas nos primeiros testes de inserção são apresentados patamares de estabilização com 4 (Snap 2) e 5 ciclos (Snap 1 e 3) com o mesmo valor de força. Este desempenho se assemelha ao do PETG, cujos machos exibiram nível de preservação dos



valores de força entre 5 (Snap 1 e 2) e 6 (Snap 3) ciclos — Figura 159 (b). Para uma melhor compreensão da comparação descrita, o gráfico da Figura 166 (a) e (b) representa o número de ciclos para qual um determinado valor de força se manteve, respectivamente para os sistemas em SLS e PETG.

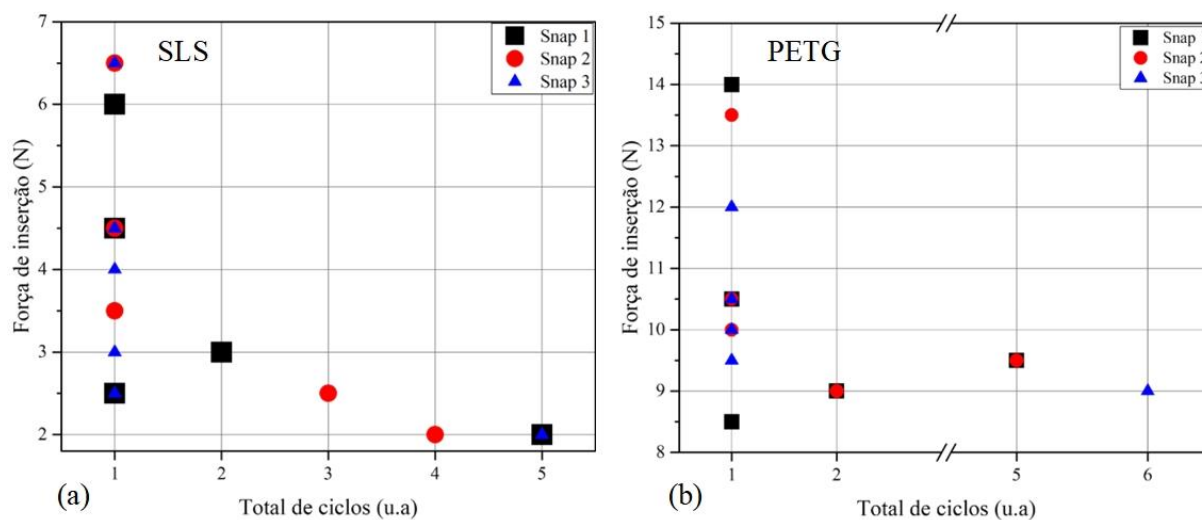


Figura 166 – Força de inserção versus o total de ciclos em que esteve constante, (a) SLS e (b) PETG.

Já os componentes impressos em PLA e pela tecnologia *PolyJet*<sup>®</sup>, assim como na redução percentual, na análise ciclo a ciclo também se comportaram de forma parecida, como pode ser visto no gráfico de força de inserção versus total de ciclos, Figura 167 (a) e (b), no qual se manteve constante. Em ambas as situações, observa-se uma tendência de perda contínua da resistência mecânica dos materiais, tendo em conta a maior concentração de pontos de força associados a um ciclo. Os maiores patamares de estabilização da resposta foram entre 3 e 4 ciclos, para ambos os casos.

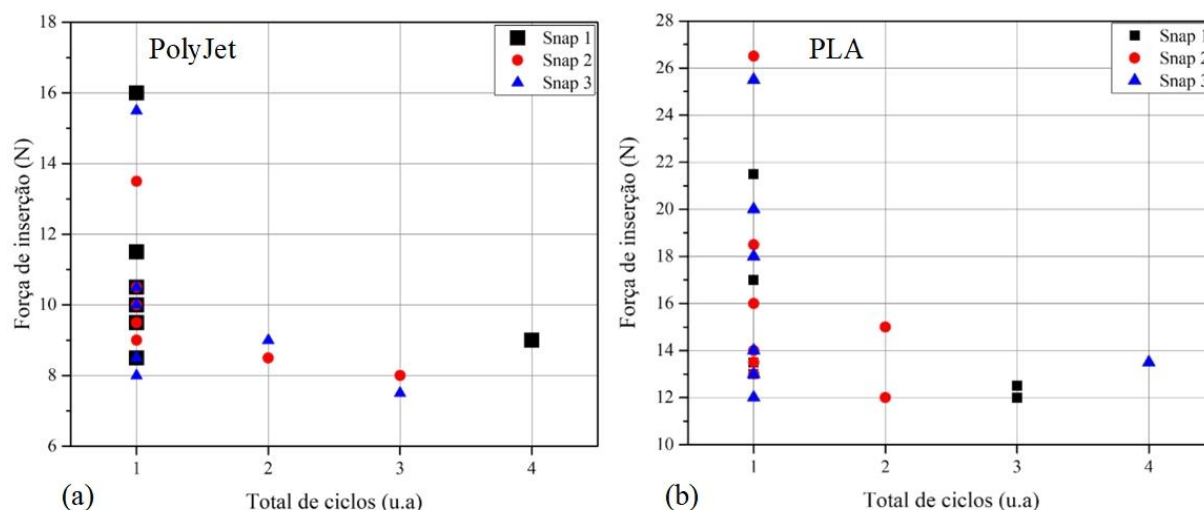


Figura 167 – Força de inserção versus o total de ciclos em que esteve constante, (a) *PolyJet*<sup>®</sup> e (b) PLA.

O PETG impresso na configuração unidirecional, conforme verificado anteriormente pela análise de DMA, caracterizou-se como um material com maior capacidade de armazenamento de energia e com menor relaxamento das tensões, características estas que o tornaram mais adequados que o PLA, nos mesmos critérios, para a aplicação em *snap-fits*. Por analogia, a tendência de estabilização da força apresentada pelas peças em SLS pode ser um indicativo de que o material *PA2200 balance* (Poliamida 12) também disponha de boas respostas a esforços cíclicos. No outro sentido, a correspondência no comportamento do VeroGray — material, neste estudo, utilizado na tecnologia *PolyJet*<sup>®</sup> — com o do PLA indica que este, nas condições analisadas, dispõe de uma característica de maior dissipação de energia.

É conhecido, porém, através dos valores do módulo de *Young*, que o PETG impresso unidirecionalmente (1,92 GPa) e o *PA2200 balance* — 1,69 GPa (EOS, 2010) — apresentam um perfil flexível, quando comparados ao PLA (na mesma configuração de impressão) (3,59 GPa) e ao VeroGray — 2,5 GPa (STRATASYS, 2015). Apesar de sofrerem quedas na força de inserção nos primeiros ciclos de montagem, provavelmente pela formação de falhas, a flexibilidade das peças em PETG e SLS garante uma melhor resistência às deformações do processo de encaixe, após as forças envolvidas atingirem um valor suportável ao equilíbrio dos materiais. Os materiais mais rígidos, por sua vez, ao se oporem com mais rigor à deflexão envolvida, estão sujeitos a deformações plásticas de maior magnitude e propagação.

#### 4.2.2 Conclusões sobre o estudo dos *snap-fits* impressos (Parte 2)

As análises realizadas nesta etapa experimental confirmam o PETG como um material mais adequado que o PLA para aplicação em sistemas *snap-fit* fabricados pelo processo de Impressão 3D por extrusão, colaborando com todos os estudos conduzidos nesta tese. Mesmo dispondo de uma estrutura influenciada por características induzidas pela tecnologia de impressão, tais como a presença de linhas de adesão e vazios (prováveis pontos de falhas), é possível garantir que, em parte, as propriedades naturais do material, como a sua flexibilidade inerente, identificadas com as amostras injetadas na seção 3.4, fazem-se presentes nas peças impressas, garantindo aos sistemas maior capacidade de armazenamento de energia e menor relaxamento das tensões. Tais atributos mencionados atendem, portanto, a requisitos desejáveis para o desenvolvimento e funcionamento adequado de conexões rápidas.

As propriedades elásticas do PETG, identificadas com a análise de DMA, justificam as boas respostas dos machos fabricados com o polímero observadas no estudo da superfície em POM que, mesmo com falhas de maiores magnitudes, responderam melhor aos esforços cíclicos quando comparados ao PLA. Por outro lado, os piores resultados do PLA são compreendidos uma vez que se constatou, neste estudo, que se trata de um material mais rígido, porém com maior tendência à dissipação de energia. A característica é indesejável para sistemas que devam ser solicitados múltiplas vezes. Assim fica clara a forte influência do tipo de material para o projeto de sistemas em Impressão 3D, indicando aos usuários e projetistas a necessidade de um processo adequado de seleção dos filamentos de impressão antes do planejamento construtivo das peças, etapa bastante divulgada na literatura técnica.

Outra importante contribuição do presente estudo está relacionada ao aspecto de interação entre as superfícies do macho e da fêmea. A influência do atrito foi determinante para o aumento da magnitude da força de inserção, em ambos os materiais, na condição de interação do macho com uma fêmea impressa; também para o pior desempenho dos machos em PLA, pois as maiores forças agravaram os mecanismos de falhas nas peças com tal material. A alternância entre as ações do atrito estático, que necessita maiores forças para romper o estado de repouso, e o dinâmico, com deslocamentos em pequenos intervalos, gera esforços de fadiga ao longo do movimento de inserção e remoção. Em outras palavras, as conexões *snap-fit* fabricadas por Impressão 3D por extrusão estão sujeitas a dois mecanismos de esforços cíclicos: (i) montagem e desmontagem (global), e (ii) cargas variáveis geradas pelo atrito dentro de cada ciclo de encaixe e desencaixe. Em materiais com baixa capacidade de armazenamento de energia, como o PLA, o efeito conjunto acelera a formação e propagação de danos.

O segundo mecanismo de fadiga, gerado pelo atrito, pode ser melhorado através do refinamento das superfícies impressas, reduzindo as ondulações e também pelo uso de materiais diferentes na interface de contato (macho e fêmea com diferentes polímeros). A variação das dimensões internas da fêmea em PLA indicam que o comportamento dimensional nestas direções pode estar relacionado a uma função de forma/material, visto que o PETG apresentou valores mais próximos ao nominal. Apesar de no estudo das geometrias vazadas os materiais apresentaram comportamentos semelhantes, neste estudo as paredes finas das fêmeas podem ter evidenciado efeitos como o inchamento do PLA, que anteriormente foram superados pelo maior espaço de acomodação oferecido pelo desenho das amostras.

O experimento alerta sobre a importância de evitar o uso de configurações de impressão, como as verticais, que favoreçam a aplicação de cargas sobre as linhas de adesão entre as camadas. Além de serem sistemas de alta dissipação de energia, inclusive no PETG, as peças na vertical favoreceram as variações de forma dos machos e a fadiga interna dos movimentos de montagem, devido ao encaixe entre as superfícies. Esse conjunto de características inviabilizou a operação das conexões *snap-fit*, seguindo recomendações de projeto para conexões injetadas.

Por fim, os resultados deste trabalho colocam o PETG como uma alternativa, de baixo custo e acessível a um maior público, para o desenvolvimento de sistemas de encaixe. As peças com o material demonstraram comportamentos, dentro do cenário investigado, comparáveis ou melhores aos de conjuntos obtidos por tecnologias de manufatura aditiva de alto desempenho, SLS e *PolyJet*<sup>®</sup>.

# CAPÍTULO 5

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

### 5.1 CONCLUSÃO

Ao longo desta tese, adotou-se uma filosofia de apresentação de conclusões parciais, com o objetivo de aprofundar as contribuições científicas de cada um dos estudos prático-experimentais realizados. Neste sentido, a colaboração desta investigação será sintetizada neste tópico em termos metodológico e técnicos, que conduziram aos resultados satisfatórios obtidos no âmbito da produção de *snap-fits* por Impressão 3D por extrusão de baixo custo.

Antes de iniciar um procedimento de otimização do processo de impressão, visando o desenvolvimento de uma aplicação final, os usuários dos sistemas de Manufatura Aditiva de baixo custo devem desenvolver um entendimento do sistema (máquina, parâmetros e materiais). Trata-se, portanto, do primeiro passo para a satisfação dos consumidores desta comunidade. É possível que nem todos os sistemas de Impressão 3D, baseados na tecnologia explorada nesta pesquisa, respondam de forma semelhante ao ajuste dos níveis dos parâmetros de processo que melhoraram as características avaliadas neste estudo. No entanto, os procedimentos metodológicos para planejamento experimental e análise, principalmente o “passo a passo” aqui aplicados, servem de base para qualquer estudo com o intuito de identificar os fatores de influência e calibrar um sistema para o desenvolvimento de produtos finais. Esta caracteriza-se como uma das contribuições globais desta tese, chamada de “relação de reconhecimento usuário-sistema de impressão”<sup>61</sup>.

Tal relação foi definida como um conjunto de quatro palavras: desconhecimento, aproximação, experimentação e constatação. O desconhecimento é algo que atinge tanto usuários comuns como técnicos, no momento de fabricar/desenvolver componentes por Impressão 3D, e consiste em dúvidas como: qual *software* de fatiamento deve ser usado? Quais parâmetros ajustar? Qual material utilizar? Como projetar as peças? Entre outras.

Esta tese ressalta a importância de se fabricar componentes com características pertinentes à aplicação final, a partir do estado inicial do sistema de impressão; em outras

---

<sup>61</sup> A maneira com que esta relação foi estabelecida neste estudo, de forma sintética e gráfica, pode ser observada na Figura 172 no Apêndice C.

palavras, da maneira que se encontra, desde que esteja funcional, no primeiro contato com o usuário. O procedimento consiste na fase de aproximação. Nesta pesquisa, a etapa se caracterizou pelo estudo de caso “*UDOO case*”, que demonstrou eficiência no mapeamento dos problemas associados à Impressão 3D de componentes com *snap-fits*. Confirmou-se como um método interativo, no qual o elemento humano confronta e vivencia as adversidades do processo de fabricação de forma visual, tátil e mensurável, aumentando assim o foco na definição de objetivos, busca por soluções e pesquisa bibliográfica.

O estágio de experimentação é o momento no qual o utilizador desenvolve as estratégias (baseadas em métodos científicos, tais como Taguchi e planejamento Fatorial) para corrigir os problemas identificados no passo anterior e define, com base em sua aplicação e na literatura, quais os critérios de qualidade relevantes e os principais fatores que os afetam. No presente trabalho, a questão da pesquisa, neste caso a confecção de *snap-fits*, foi fragmentada em duas grandes etapas: (i) estudos preliminares e (ii) específicos à análise de conexões impressas. A primeira foi dividida na identificação de erros (engloba a aproximação), na calibração dimensional, na seleção e caracterização dos materiais, e na análise da qualidade das superfícies (rugosidade e atrito). Essa fase colabora (e demonstrou eficácia) com a pesquisa em dois pontos fundamentais: (i) simplificação geométrica e (ii) uso de métodos de análise simples.

Os resultados da etapa preliminar responderam a boa parte das questões do cenário do desconhecimento e reduziram significativamente o número de variáveis para a análise de desempenho das conexões *snap-fit* impressas. A última parte da relação de reconhecimento, isto é, quando esta é estabelecida, consiste na constatação. Como o próprio nome sugere, o usuário conclui e entende o que influencia o processo e pode desenvolver mecanismos de ação no sistema. As constatações desta tese, assim, podem ser resumidas em:

- a) aspecto dimensional: em todos os estudos que envolveram a análise das dimensões, principalmente na etapa preliminar, a principal causa para os desvios nas medidas foi o excesso de material, evidente no cenário de peças fabricadas com 100% de preenchimento. Concluiu-se que o feito foi decorrente de dois fatores: (i) cálculos errôneos do comprimento de filamento frente o volume teórico das peças, pelos *softwares* de fatiamento, e (ii) material de impressão, em termos de fluidez do polímero (esta tese colabora com informações para o PLA e o PETG) e variação do diâmetro do filamento. Quanto ao *software*, as análises desenvolvidas nesta tese auxiliam e buscam incentivar os usuários a criar um hábito de verificar o código de construção (Gcode) das peças antes da impressão. Tal averiguação pode ser realizada a partir de simuladores de código, disponíveis na rede de comunicação da Impressão

3D *open-source*, ou a partir de planilhas de cálculo, desenvolvidas pelo próprio usuário. Os erros induzidos pelo fatiador foram reduzidos pelo ajuste do multiplicador de extrusão. Sobre esse parâmetro, destaca-se uma importante contribuição da tese, uma vez que poucos usuários se concentram na calibração da variável. O desmembramento da geometria complexa dos *snap-fits* em forma simples, como os cubos e os paralelepípedos vazados, foi fundamental para facilitar o entendimento da influência dos parâmetros de processo e dos materiais. Os melhores ajustes encontrados com os padrões foram replicados com bons resultados na fabricação das conexões do Capítulo 4. Destaca-se o PETG, que superou o PLA pela maior conformidade das dimensões internas das fêmeas impressas, como o material com melhor capacidade de reproduzir os desenhos originais. Em síntese, os problemas dimensionais identificados no *UDOO case* foram superados de forma satisfatória com o ajuste das variáveis de impressão e a seleção do material. O uso de métodos simples de medição, dimensional (manual) e de massa, na maior parte dos casos, torna os procedimentos de calibração acessíveis a um público mais amplo;

- b) caracterização dos materiais: o estudo demonstrou que os filamentos avaliados nesta tese, PLA e PETG, apresentaram semelhanças com os mesmos materiais abordados em outras áreas do conhecimento. Além disso, o comportamento térmico e químico dos materiais foi pouco alterado, em relação ao estado inicial (filamento), pelos diferentes processos de fabricação aos quais foram submetidos (injeção e Impressão 3D). Outra importante contribuição para a comunidade da Impressão 3D foi sobre a caracterização do PETG em termos químicos, térmicos e mecânicos (impressos e injetados), já que se trata de um material de recente adesão no cenário em questão. O estudo destacou também a evolução da tecnologia de Manufatura Aditiva por extrusão, uma vez que foram alcançados valores de resistência máxima à tração em torno de 93% no PLA e 83% no PETG, daqueles obtidos em peças injetadas com os mesmos materiais. Ahn *et al.* (2002), em estudo clássico da área, encontraram valores entre 65% e 73%. O melhor comportamento mecânico das peças impressas foi obtido a partir da análise da orientação de construção e do uso de estratégias concêntricas, que garantiram filamentos unidirecionais à aplicação das cargas. Sobre as peças injetadas, este trabalho contribui com a literatura, uma vez que as propriedades à tração dos materiais foram obtidas diretamente dos filamentos moídos e processados. Todas as constatações aqui apresentadas são importantes ferramentas para pessoas

dos mais diversos ramos técnicos, ou mesmo entusiastas, na confecção de projetos funcionais;

- c) qualidade das superfícies: a etapa demonstrou que um método simples e acessível, o plano inclinado, baseado nos conceitos clássicos da Física, pode ser utilizado como uma alternativa para estudos técnicos em Engenharia. Foi possível identificar que a relação entre as rugosidades das superfícies em contato é determinante para a variação do coeficiente de atrito estático. Quanto mais próximas forem, maior o coeficiente. Isso acontece porque aumenta-se a afinidade entre elas. No entanto, caso os usuários da tecnologia não tenham acesso a um sistema de medição de rugosidade, o entendimento da disposição dos filamentos nas superfícies, modificada com ajuste do ângulo de varredura, é suficiente para definir as condições de contato. O projetista deve associar a orientação do ângulo de deposição entre os filamentos das duas faces em contato, e pensar no movimento relativo entre elas. Neste sentido, a configuração de construção das superfícies deve evitar o encaixe entre as mesmas e, caso ocorra, que seja na direção do movimento;
- d) desempenho dos *snap-fits*: esta investigação concluiu que a performance dos sistemas *snap-fit* obtidos pelo processo de Impressão 3D por extrusão é fortemente influenciada pelos materiais nos quais são fabricados. É desejável que disponha de flexibilidade, capacidade de armazenamento de energia elástica e menor relaxamento das tensões. Todas essas características foram atendidas pelo PETG, tornando-o um material adequado para o uso na fabricação de sistemas de encaixe. As propriedades naturais do PETG identificadas com as amostras injetadas, relacionadas a sua natureza totalmente amorfa, que garante um comportamento flexível — concordando com os conceitos descritos por Banik (2006) e Carraher Jr. (2017) —, fazem-se presentes nas peças impressas, permitindo que as limitações decorrentes da estrutura (presença de vazios e linhas de união), bem como falhas adquiridas ou inseridas (pelo *software* de fatiamento), sejam superadas e seja observada uma melhor resposta a esforços cíclicos quando comparado ao PLA. As deficiências do PLA estão relacionadas à maior rigidez, com baixa capacidade de deformação (principalmente em componentes impressos) e ao comportamento de maior dissipação de energia, indesejáveis para componentes *snap-fit*. Esses aspectos corroboram o estudo de Tronvoll *et al.* (2018). O desempenho dos *snap-fits* impressos é afetado também por forças manuais de desmontagem, que por sua magnitude aleatória, podem acelerar o processo de degradação mecânica das peças. Além do material e das cargas manuais, as condições



de atrito entre as superfícies também são significativas para o funcionamento das conexões. O efeito aumenta consideravelmente a força de inserção e, portanto, as cargas sobre as estruturas das peças impressas, e devido à maior atuação do atrito estático, gera um esforço de fadiga dentro dos movimentos de inserção e remoção, o que contribui para as variações da força de montagem entre ciclos;

- e) dada a proximidade entre os valores experimentais da força de inserção medidos e teóricos, conclui-se que as propriedades mecânicas e de atrito obtidas em componentes padrões são transferidas para os elementos específicos (customizáveis).

O cenário descrito auxilia no projeto.

Outra importante contribuição global deste trabalho é de que a fabricação de conexões *snap-fit* pelo processo de Impressão 3D por extrusão é possível, opondo-se ao estudo de Klahn *et al.* (2016). A baixa resistência mecânica e a tendência de delaminação nas peças, associada pelos autores à tecnologia, foram superadas neste estudo por exercícios de parametrização (análise da capacidade) e pela escolha de um material com propriedades flexíveis. As peças em PETG apresentaram qualidade semelhante, ou superior, à de componentes fabricados por processos aditivos como SLS e *PolyJet*®, demonstrando que o material pode ser uma alternativa para aplicações em componentes de Engenharia. Acrescenta-se, ainda, que devido às características dos equipamentos e do processo, principalmente em relação ao volume de trabalho, os sistemas de baixo custo se tornam adequados ao desenvolvimento de componentes customizados e, neste sentido, estes elementos podem ser facilmente reconstruídos e substituídos mediante falhas. A investigação oferece, assim, uma solução de baixo custo e acessível para o desenvolvimento de produtos.

A pesquisa desenvolvida colabora ainda com os estudos de Torossian e Bourell (2015), Allison *et al.* (2017a), ambos com a tecnologia SLS, Bareta *et al.* (2011), Udriou (2012), Seidl *et al.* (2015), e Ashour e Kersaudy-Kerhoas (2017), os quatro com *PolyJet*®, realizados no âmbito da aplicação da Manufatura Aditiva em *snap-fits*. Complementa também, pela análise cíclica dos *snaps*, os trabalhos de Kovacs *et al.* (2017) e Chacón *et al.* (2017), que estudaram sistemas de montagem obtidos pelo processo de Impressão 3D por extrusão. Por fim, este trabalho vai além da fabricação e análise de conexões *snap-fit*, uma vez que demonstra que a tecnologia em análise, isto é, a Impressão 3D de baixo custo, é uma ciência, e como tal, a produção de peças para uso final é uma função de respostas obtidas por metodologias estruturadas.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomendam-se novos estudos sobre os seguintes tópicos:

- a) avaliar a influência da geometria, e suas peculiaridades, na qualidade dimensional de peças fabricadas pelo processo de Impressão 3D por extrusão;
- b) aprimorar os dispositivos e métodos para a medição da força de inserção em sistemas *snap-fit*;
- c) desenvolvimento de um sistema capaz de medir a influência das cargas manuais no desempenho de conexões *snap-fit* impressas. Neste âmbito, realizar medições com grupos de pessoas, visando avaliar a resposta tátil e mapear a perda de resistência dos elementos diante da aplicação de cargas aleatórias;
- d) comparar experimentalmente o desempenho de conjuntos *snap-fit* impressos com elementos injetados no mesmo material;
- e) investigar a capacidade da tecnologia de Impressão 3D por extrusão de baixo custo na confecção de outros tipos de conexão *snap-fit* (rotular, anelar, entre outros);
- f) avaliar a utilização de filamentos com propriedades semiflexíveis para a fabricação dos sistemas de encaixe;
- g) estudar o uso de materiais com propriedades de baixo coeficiente de atrito na produção das partes da conexão *snap-fit*. Otimizar a qualidade das superfícies em contato, visando reduzir o efeito do atrito na força de montagem e aumentar a vida útil das conexões;
- h) avaliar o uso de soluções solventes para suavizar as superfícies e reduzir a força de inserção dos *snap-fits*;
- i) desenvolver metodologias de projeto para sistemas impressos com conexões *snap-fit* e uma plataforma interativa para o usuário (*software*, aplicativos para *tablet* e *smartphone*);
- j) estudar os *snap-fits* impressos em um cenário real de aplicação;
- k) aprofundar o estudo das propriedades mecânicas dinâmicas de peças impressas por extrusão e a análise reológica dos polímeros.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AFROSE, Mst Faujiya et al. Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material. **Progress in Additive Manufacturing**, [S.I.], v.1, n.1, p. 21-28, jun. 2016a.

AFROSE, Mst. Faujiya. **Mechanical and Viscoelastic Properties of Polylactic Acid (PLA) Materials Processed Through Fused Deposition Modelling (FDM)**. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Master Of Engineering, School of Engineering, Faculty of Science, Engineering and Technology, Swinburne University Of Technology, Hawthorn, Australia, 2016b.

AGARWALA, Mukesh K. et al. Structural quality of parts processed by fused deposition. **Rapid Prototyping Journal**, [S.I.], v.2, n.4, p. 4-19.1996.

AHN, Sung-Hoon et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, **Rapid Prototyping Journal**, [S.I.], v.8, n.4 p.248-257. 2002.

AHN, Daekeon et al. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.I.], v. 209, n. 15 – 16, p. 5593-5600, ago. 2009.

AHMED, Jasim. Thermal Properties of Polylactides and Stereocomplex. In: AHMED, Jasim; RAHMAN, Mohammad Shafiur; ROOS, Yrjö H. (Ed.). **Glass Transition and Phase Transitions in Food and Biological Materials**. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2017. Cap. 12. p. 261-280.

AIRWOLF 3D. **What is the Difference between t-glase and PETG?** 2015. Disponível em: <<https://airwolf3d.com/2015/02/25/t-glase-and-petg/>>. Acesso em: 10 set. 2019.

AKANDE, Stephen O. Dimensional Accuracy and Surface Finish Optimization of Fused Deposition Modelling Parts using Desirability Function Analysis. **International Journal of Engineering Research and Technology**, v.4, n.4, 2015.

ALI, Fahraz; CHOWDARY, Boppana V.; MAHARAJ, Justin. Influence of Some Process Parameters on Build Time, Material Consumption and Surface Roughness of FDM Processed Parts: Inferences Based on the Taguchi Design of Experiments. In: **Proceedings of The 2014 IACJ/ISAM Joint International Conference**. 2014.

ALLISON, Jared et al. Powder bed fusion metrology for additive manufacturing design guidance. In: **SOLID FREEFORM FABRICATION 2017**, 28., 2017, Austin, Texas. **Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference**. 2017a. p. 2737 - 2756.

ALLISON, Jared; SHARPE, Conner; SEEPERSAD, Carolyn Conner. A Test Part for Evaluating the Accuracy and Resolution of a Polymer Powder Bed Fusion Process. **Journal of Mechanical Design**, [S.I.], v. 139, n. 10, p.100902. 2017b.

ALSOUFI, Mohammad S.; ELSAYED, Abdulrhman E.. How Surface Roughness Performance of Printed Parts Manufactured by Desktop FDM 3D Printer with PLA+ is Influenced by Measuring Direction. **American Journal of Mechanical Engineering**, [S.I.], v. 5, n. 5, p.211-222. 2017.

ALSSABBAGH, Moayyad et al. Evaluation of 3D printing materials for fabrication of a novel multi-functional 3D thyroid phantom for medical dosimetry and image quality. **Radiation Physics And Chemistry**, [S.I.], v. 135, p.106-112, jun. 2017.

ALVES, Fernando Jorge Lino et al. **PROTOCLICK: Prototipagem Rápida**. Porto: Protoclick, INEGI, 2001. 184 p.

ALZAHIRANI, Mohammed. **Modification of Recycled Poly(ethylene terephthalate) for FDM 3D-Printing Applications**. 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Chemical Engineering, University Of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2792**: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. United States, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638 - 10**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.

ANDERSEN, Kimball E.. **Optimization of a Low-melting Alloy for Fused Filament Fabrication**. 2015. 136 f. Master of Applied Science - School Of Mechatronic Systems Engineering, Faculty Of Applied Sciences, Simon Fraser University, Canada, 2015.

ARMILLOTTA, Antonio; BELLOTTI, Mattia; CAVALLARO, Marco. Warpage of FDM parts: Experimental tests and analytic model. **Robotics and Computer-integrated Manufacturing**, [S.I.], v. 50, p.140-152, abr. 2018.

ARAÚJO, J. P. de; AGRAWAL, P.; MÉLO, T. J. A. de. Blendas PLA/PEgAA: Avaliação da reatividade entre os polímeros e da concentração de PEgAA nas propriedades e na morfologia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [S.I.], v. 10, n. 3, p.118-127. 2015.

ASHBY, Michael; SHERCLIFF, Hugh; CEBON, David. **Materials: Engineering, Science, Processing and Design**. 4. ed. Butterworth-heinemann: Elsevier, 2018. 806 p.

ASHOUR, Mohamed; KERSAUDY-KERHOAS, Maïwenn. Microfluidic Snap-Fit Assembly Enabled by Additive Manufacturing. **Advances In Transdisciplinary Engineering**, v. 6, p.129-134, 2017. Volume 6: Advances in Manufacturing Technology XXXI (Ebook).

BAI, Hongwei et al. Tailoring Impact Toughness of Poly(l-lactide)/Poly( $\epsilon$ -caprolactone) (PLLA/PCL) Blends by Controlling Crystallization of PLLA Matrix. **Acs Applied Materials & Interfaces**, [S.I.], v. 4, n. 2, p.897-905, jan. 2012. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/am201564f>.

BÄHR, Friedrich; WESTKÄMPER, Engelbert. Correlations between Influencing Parameters and Quality Properties of Components Produced by Fused Deposition Modeling. **Procedia CIRP**, v. 72, p.1214-1219, 2018.

BAKAR, Nur Saaidah Abu; ALKAHARI, Mohd Rizal; BOEJANG, Hambali. Analysis on Fused Deposition Modeling (FDM) Performance. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)**, [S.I.], v. 11, n. 12, p. 972 – 977. 2010.

BALLETTI, Caterina; BALLARIN, Martina; GUERRA, Francesco. 3D printing: State of the art and future perspectives. **Journal of Cultural Heritage**, [S.I.], v. 26, p.172-182. 2017.

BANDYOPADHYAY, Amit; BOSE, Susmita. **ADDITIVE MANUFACTURING**. Boca Raton: Crc Press Taylor & Francis Group, 2016.

BANIK, Kaushik. **Process-induced Long-term Deformation Behavior of Injection Molded Semicrystalline Thermoplastics**. 2006. 121 f. Tese (Doutorado) - Mechanical Engineering, Chemnitz University of Technology, Institute Of Mechanical And Plastics Engineering, Chemnitz, 2006.

BARETA, Deives Roberto et al. Dimensionamento de Engates Rápidos (Snap-Fits) em Peças Obtidas por Prototipagem Rápida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO (COBEF), 6., 2011, Caxias do Sul. **Anais do COBEF**. Caxias do Sul: COBEF, 2011.

BARNATT, Christopher. **3D Printing**: Second Edition. Inglaterra: Explainingthefuture.com, 2014. 306 p.

BASF, Corporation. **Technical Expertise: Snap-Fit Design Manual**. Basf Corporation, 2007, pp. 24.

BAYER. **Snap-Fit Joints for Plastics: A Design Guide**. Pittsburgh: Bayer Materials Science Llc, 2000. Disponível em: <[http://fab.cba.mit.edu/classes/S62.12/people/vernelle.noel/Plastic\\_Snap\\_fit\\_design.pdf](http://fab.cba.mit.edu/classes/S62.12/people/vernelle.noel/Plastic_Snap_fit_design.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2016.

BĚHÁLEK, Luboš et al. Friction properties of composites with natural fibres, synthetic and biodegradable polymer matrix. **NANOCON 2012**, 2012.

BELLEHUMEUR, C. T.; LI, L.; SUN, Q.; GU, P. Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. **Journal of Manufacturing Processes**, [S.I.], v.6, n.2, p.170-178. 2004.

BELLINI, A., GÜÇERİ, S. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. **Rapid Prototyping Journal**, [S.I.], v.9, n.4, pp. 252-264. 2003.

BERCHON, Mathilde; LUYT, Bertier. **L'impression 3D**. Editions Eyrolles, 2014.

BHERING, Leonardo Lopes et al. Alternative methodology for Scott-Knott test. **Crop Breeding And Applied Biotechnology**. v.8, p. 9-16. 2008.

BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.I.], v. 83, n. 1, p. 389-405. 2016.

BITENCOURT, Schaiane Silveira et al. Desenvolvimento de biocompósitos de poli(L-ácido láctico) (PLLA) com serragem de madeira. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 4. 2017.

BONENBERGER, Paul R. The first snap-fit handbook. **Hanser, München**, 2005.

BRANDÃO, Felipe M.; SANT'ANNA, Diego Rodrigues. Influência da **Estratégia de Fabricação de Peças Prototipadas em FDM no Alongamento e na Resistência à Tração**. XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2005, Ilha Solteira – SP.

BRATL, M., **Customizable Personal Manufacturing**. 2013. Master Thesis, Fachhochschule Der Wirtschaft, Hannover.

BRISCHETTO, Salvatore et al. 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores. **Curved and Layered Structures**, [S.I.], v. 5, n. 1, p.80-94. 2018.

BRYDEN, Douglas. **CAD AND RAPID PROTOTYPING FOR PRODUCT DESIGN**. China: Laurence King Publishing Ltd, 2014.

BUYS, Y F; AZNAN, A N A; ANUAR, H. Mechanical properties, morphology, and hydrolytic degradation behavior of polylactic acid / natural rubber blends. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 290, p.1-7, 2018.

CAI, Yanming; LV, Jungang; FENG, Jimin. Spectral Characterization of Four Kinds of Biodegradable Plastics: Poly (Lactic Acid), Poly (Butylenes Adipate-Co-Terephthalate), Poly (Hydroxybutyrate-Co-Hydroxyvalerate) and Poly (Butylenes Succinate) with FTIR and Raman Spectroscopy. **Journal of Polymers and The Environment**, [S.I.], v. 21, n. 1, p.108-114. 2013.

CAMPBELL, T. A. et al. Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential and Implications of Additive Manufacturing, Strategic Foresight. **Atlantic Council**, 2011.

CAMPBELL, Ian; BOURELL, David; GIBSON, Ian. Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. **Rapid Prototyping Journal**, [S.I.], v. 18, n. 4, p. 255-258. 2012.

CANEVAROLO, Sebastião Vicente. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 282 p.

CANEVAROLO, Sebastião Vicente. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2004.

CARVALHO, Marcelo Parmentier. **ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS TERMOPLÁSTICAS USANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**. 2007. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Tecnologia dos Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CARNEIRO, O. S.; SILVA, A. F.; GOMES, Rui. Fused deposition modeling with polypropylene. **Materials & Design**, [S.I.], v. 83, p. 768-776. 2015.

CARRAHER JR, Charles E.. **Introduction to Polymer Chemistry**. 4. ed. Boca Raton: Crc Press Taylor & Francis Group, 2017.

CARRASCO, F. et al. Processing of poly(lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. **Polymer Degradation and Stability**, [S.I.], v. 95, n. 2, p.116-125. 2010a.

CARRASCO, F. et al. Kinetics of the thermal decomposition of processed poly(lactic acid). **Polymer Degradation and Stability**, [S.I.], v. 95, n. 12, p.2508-2514, dez. 2010b.

CASAVOLA, Caterina et al. Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory. **Materials & Design**, [S.I.], v. 90, p. 453-458. 2016.

CASAVOLA, Caterina et al. Residual stress measurement in Fused Deposition Modelling parts. **Polymer Testing**, [S.I.], v. 58, p.249-255. 2017.

CASSU, Silvana Navarro; FELISBERTI, Maria Isabel. Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. **Química Nova**, [S.I.], v. 28, n. 2, p.255-263. 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422005000200017>.

CASTRO-AGUIRRE, E. et al. Poly(lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. **Advanced Drug Delivery Reviews**, [S.I.], v. 107, p.333-366. 2016.

CEREGATTI, Thayara et al. Electrical and thermal properties of PLA/CNT composite films. **Matéria (rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3. 2017.

CES EduPack, Version 18.1.1, United Kingdom: Granta Design Limited, 2018.

COHEN, Michael. **Classical Mechanics: a Critical Introduction**. Philadelphia: University Of Pennsylvania, 2012. 364 p. Disponível em: <<https://www.physics.upenn.edu/resources/online-textbook-mechanics>>. Acesso em: 25 set. 2017.

COLE, K. C. et al. Characterization of Surface Orientation in Poly(ethylene terephthalate) by Front-Surface Reflection Infrared Spectroscopy. **Applied Spectroscopy**, [S.I.], v. 48, n. 12, p.1513-1521, jan. 1994.

COLE, Kenneth C.; AJJI, Abdellah; PELLERIN, Éric. New Insights into the Development of Ordered Structure in Poly(ethylene terephthalate). 1. Results from External Reflection Infrared Spectroscopy. **Macromolecules**, [S.I.], v. 35, n. 3, p.770-784. 2002.

CONNER, Brett P. et al. Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. **Additive Manufacturing**, [S.I.], v. 1, p. 64-76, 2014.

CORRADI, Wagner et al. **Fundamentos de Física I**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 514 p.

CHACÓN, J.m. et al. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal

selection. **Materials & Design**, [S.I.], v. 124, p.143-157, jun. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.

CHANDRAPPA, Anush K.; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. Pore Structure Characterization of Pervious Concrete Using X-Ray Microcomputed Tomography. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, v. 30, n. 6, p.04018108-1 – 04018108-11, jun. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002285](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002285)

CHEN, Yi-Ho; LAN, Chao-Chieh. Design of a constant-force snap-fit mechanism for minimal mating uncertainty. **Mechanism and Machine Theory**, [S.I.], v. 55, p. 34-50. 2012.

CHEN, Tingting et al. Poly(ethylene glycol-co-1,4-cyclohexanedimethanol terephthalate) random copolymers: effect of copolymer composition and microstructure on the thermal properties and crystallization behavior. **Rsc Advances**, [S.I.], v. 5, n. 74, p.60570-60580. 2015a.

CHEN, Tingting; ZHANG, Weikai; ZHANG, Jun. Alkali resistance of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene glycol-co-1,4-cyclohexanedimethanol terephthalate) (PETG) copolyesters: The role of composition. **Polymer Degradation and Stability**, [S.I.], v. 120, p.232-243. 2015b.

CHEN, Tingting; ZHANG, Jun. Surface hydrophilic modification of acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer by poly(ethylene glycol-co-1,4-cyclohexanedimethanol terephthalate): Preparation, characterization, and properties studies. **Applied Surface Science**, [S.I.], v. 388, Part A, p.133-140. 2016.

CHIENG, Buong et al. Epoxidized Vegetable Oils Plasticized Poly(lactic acid) Biocomposites: Mechanical, Thermal and Morphology Properties. **Molecules**, [S.I.], v. 19, n. 10, p.16024-16038, 8 out. 2014.

CHRISTIYAN, KG Jaya; CHANDRASEKHAR, U.; VENKATESWARLU, K. A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2016.

CHOKSI, Nikita; DESAI, Hemangi. Synthesis of Biodegradable Polylactic Acid Polymer By Using Lactic Acid Monomer. **International Journal of Applied Chemistry**, [S.I.], v. 13, n. 2, p.377-384. 2017.

CHUA, C.K.; LEONG, F. K.; LIM, C.S.. **Rapid Prototyping: PRINCIPLES AND APPLICATIONS**. Singapore: World Scientific, 2003.

CHUA, C.K; LEONG, K. F; LIM, C. S. **Rapid Prototyping: Principles and Applications**. 3. ed. Singapura: World Scientific Publishing, 2010. 540 p.

CROMPTON, T.R. **Polymer Reference Book**. United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2006.

CRUZ, Carolina Vertú Marinho da. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE BARREIRA EM FILMES DE NANOCOMPÓSITOS OBTIDOS DE BLENDS DE PEAD/PEBDL COM MONTMORILONITA ORGANOFÍLICA**. 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de



Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

CUIFFO, Michael Arthur et al. Impact of the Fused Deposition (FDM) Printing Process on Polylactic Acid (PLA) Chemistry and Structure. **Applied Sciences**, [S.I.], v. 7, n. 6, p.579, jun. 2017.

CULLER, J. A.. **A Text-Book of General Physics For Colleges: Mechanics and Heat**. Philadelphia: Bv. J.b. Lippincott Company, 1909.

ĆWIKŁA, G et al. The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.I.], v. 227, p.012033. 2017

DAWOUD, Michael; TAHA, Iman; EBEID, Samy J. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. **Journal of Manufacturing Processes**, [S.I.], v. 21, p. 39-45. 2016.

DECICCO, Anthony. **EFFECTS OF BUILD PARAMETERS ON ADDITIVE MATERIALS**. 2013. 193 f. Degree of Bachelor of Science- Mechanical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, 2013.

DELASSUS, P. Barrier Polymers. In: **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**. [S.I.] John Wiley & Sons, Inc., 2002.

DHOTEL, Alexandre et al. Combining Flash DSC, DSC and broadband dielectric spectroscopy to determine fragility. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [S.I.], v. 121, n. 1, p. 453-461. 2015.

DO VALE, João Luiz. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO POLITETRAFLUORETILENO EM DESLIZAMENTO SEM LUBRIFICAÇÃO CONTRA AÇO INOXIDÁVEL**. 2014. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

DOMINGO-ESPIN, Miquel; BORROS, S; AGULLO, N; GARCIA-GRANADA, A. A., REYES, G. Influence of Building Parameters on the Dynamic Mechanical Properties of Polycarbonate Fused Deposition Modeling Parts. **3D Printing and Additive Manufacturing**, [S.I.], v. 1, n. 2, p. 70-77. 2014.

DONG, Sheng; DAPINO, Marcelo J. Wear reduction through piezoelectrically-assisted ultrasonic lubrication. **Smart Materials and Structures**, [S.I.], v. 23, n. 10. 2014.

DUPAIX, Rebecca B.; BOYCE, Mary C. Finite strain behavior of poly (ethylene terephthalate) (PET) and poly (ethylene terephthalate)-glycol (PETG). **Polymer**, [S.I.], v. 46, n. 13, p. 4827-4838. 2005.

DUPONT. **DUPONT™ DELRIN® ACETAL HOMOPOLYMER WHITE PAPER: HOW TO MAXIMIZE THE PROPERTY ADVANTAGES OF DELRIN® ACETAL HOMOPOLYMER OVER ACETAL COPOLYMER - A GUIDE FOR DESIGN**

ENGINEERS. Dupont, 2015. Disponível em: <<https://www.emcoplastics.com/assets/pdf/acetal/Delrin%20Homopolymer%20Advantages%20Over%20Acetal%20Copolymer%20Dupont.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2018.

DU PLESSIS, Anton; ROUX, Stephan Gerhard Le; STEYN, Francis. X-Ray Computed Tomography of Consumer-Grade 3D-Printed Parts. **3d Printing and Additive Manufacturing**, [S.I.], v. 2, n. 4, p.190-195, 2015. Mary Ann Liebert Inc.

DU PLESSIS, Anton et al. Simple and fast porosity analysis of concrete using X-ray computed tomography. **Materials and Structures**, [S.I.], v. 49, n. 1-2, p.553-562, jan. 2016. Citação de acordo com: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-014-0519-9#citeas>

EASTMAN. **Technical Data Sheet: Eastar™ Copolyester 6763**. Eastman Chemical Company, 2016. Disponível em: <[http://ws.eastman.com/ProductCatalogApps/PageControllers/ProdDatasheet\\_PC.aspx?Product=71040786&sCategoryName=Generic](http://ws.eastman.com/ProductCatalogApps/PageControllers/ProdDatasheet_PC.aspx?Product=71040786&sCategoryName=Generic)>. Acesso em: 04 ago. 2016.

EOS. **PA 2200 Balance 1.0: PA12**. EOS GmbH - Electro Optical Systems, 2010.

EQUBAL, Azhar et al. Optimization of process parameters of fdm part for minimiizing its dimensional inaccuracy. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)**, [S.I.], v. 7, n. 2, p.57-66. 2017.

ERHARD, Gunter. **Designing with Plastics**. Munich: Carl Hanser Verlag Gmbh & Co. Kg, 2006. 538 p.

EVANS, Brian. **Practical 3D printers: The science and art of 3D printing**. Apress, 2012.

FERREIRA, Isaac Alves; ALVES, Jorge Lino. Low-cost 3D food printing. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, [S.I.], v. 29, n.1, p. e265-e269. 2017.

FISCHER, E. W.; STERZEL, Hans J.; WEGNER, G.. Investigation of the structure of solution grown crystals of lactide copolymers by means of chemical reactions. **Kolloid-zeitschrift Und Zeitschrift Für Polymere**, [S.I.], v. 251, n. 11, p.980-990, nov. 1973.

FITZHARRIS, Emily R. et al. Interlayer bonding improvement of material extrusion parts with polyphenylene sulfide using the Taguchi method. **Additive Manufacturing**, [S.I.], v. 24, p.287-297. 2018.

FUJIWARA, Kazunori et al. Mechanical evaluation of newly developed mouthpiece using polyethylene terephthalate glycol for transoral robotic surgery. **Journal of robotic surgery**, [S.I.], v. 9, n. 4, p. 347-354, 2015.

GALANTUCCI, L. M. et al. Analysis of dimensional performance for a 3D open-source printer based on fused deposition modeling technique. **Procedia CIRP**, v. 28, p. 82-87, 2015.

GARLOTTA, Donald. A literature review of poly (lactic acid). **Journal of Polymers and the Environment**, [S.I.], v. 9, n. 2, p. 63-84. 2001.

GARG, Ashu; BHATTACHARYA, Anirban; BATISH, Ajay. On surface finish and dimensional accuracy of FDM parts after cold vapor treatment. **Materials and Manufacturing Processes**, [S.I.], v. 31, n. 4, p. 522-529. 2016.

GARCÍA-CAMPO, María Jesús et al. Manufacturing and Characterization of Toughened Poly (lactic acid)(PLA) Formulations by Ternary Blends with Biopolyesters. **Polymers**, [S.I.], v. 10, n. 3.2018.

GEBHARDT, Andreas. **Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing**. Munich: Hanser Publications, 2011.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2. ed. New York: Springer Science+business Media, 2015. 498 p.

GIBB, Alicia et al. **Building Open Source Hardware: DIY Manufacturing for Hackers and Makers**. United States of America: Pearson Education, Inc., 2015.

GNECCO, Enrico; MEYER, Ernst. **Elements of Friction Theory and Nanotribology**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2015.

GOH, G. D. et al. Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, p.1-21, 2019. <http://dx.doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>.

GOENKA, Gaurav. **Modeling and investigation of elastomeric properties in materials for additive manufacturing of mechanistic parts**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore, 2011.

GOMEZ-GRAS, Giovanni et al. Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. **Materials & Design**, [S.I.], v. 140, p.278-285. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.072>.

GONZALEZ, Sara Russell; BENNETT, Denise Beaubien. Planning and implementing a 3D printing service in an academic library. **Issues in Science and Technology Librarianship**, n. 78, p. 1-14, 2014.

GORDEEV, Evgeniy G.; GALUSHKO, Alexey S.; ANANIKOV, Valentine P.. Improvement of quality of 3D printed objects by elimination of microscopic structural defects in fused deposition modeling. **Plos One**, [S.I.], v. 13, n. 6, p.e0198370, 7 jun. 2018.

GÓRSKI, Filip et al. Computation of Mechanical Properties of Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling Using Finite Element Method. In: 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFT COMPUTING MODELS IN INDUSTRIAL AND ENVIRONMENTAL APPLICATIONS, 10., 2015. **Advances in Intelligent Systems and Computing**. [S.I.]: Springer, Cham, 2015a. v. 368, p. 403 - 413.

GÓRSKI, Filip et al. Strength of ABS parts produced by Fused Deposition Modelling technology—a critical orientation problem. **Advances in Science and Technology Research Journal**, [S.I.], v. 9, n. 26, p. 12-19, 2015b.

GÓRSKI F., WICHNIAREK R., ANDRZEJEWSKI J.. Influence of part orientation on strength of ABS models manufactured using Fused Deposition Modeling technology, **Polymer Processing**, [S.I.], v.9, p.428-435. 2012.

GROSS, Bethany C. et al. Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. **Analytical chemistry**, [S.I.], v. 86, n. 7, p. 3240-3253. 2014.

GUSTAFSSON, Erik. **Investigation of friction between plastic parts**. 2013. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Division of Solid Mechanics, Department Of Applied Mechanics, Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden, 2013.

GUO, R.H. et al. Microstructure and electromagnetic interface shield-ing effectiveness of electrodes Ni-P plated polyester fabric. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, [S.I.], v.20, n.8, pp. 735-740.2009.

GUERRERO-DE-MIER, A.; ESPINOSA, M. M.; DOMÍNGUEZ, M. Bricking: A new slicing method to reduce warping. **Procedia Engineering**, [S.I.], v. 132, p. 126-131. 2015.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentals of physics**. 9. ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.

HAMI, Zahra et al. Doxorubicin-conjugated PLA-PEG-Folate based polymeric micelle for tumor-targeted delivery: Synthesis and in vitro evaluation. **DARU Journal of Pharmaceutical Sciences**, [S.I.], v. 22, n. 30. 2014.

HANSEN, André; HOWARD, Thomas J. The Current State of Open Source Hardware: The Need for an Open Source Development Platform. In: **ICoRD'13**. Springer India, 2013. p. 977-988.

HAUSMAN, Kalani Kirk; HORNE, Richard. **3D Printing For Dummies®**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2014.

HELMENSTINE, Anne Marie. **An Introduction to Brownian Motion**. 2019. Disponível em: <<https://www.thoughtco.com/brownian-motion-definition-and-explanation-4134272>>. Acesso em: 9 fev. 2019.

HENTON, David E. et al. Polylactic acid technology. In: MOHANTY, Amar K.; MISRA, Manjusri; DRZAL, Lawrence T.. **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**. Boca Raton: Crc Press Taylor & Francis Group, 2005. Cap. 16. p. 527-577.

HERNANDEZ, Ruben J.. POLYMER PROPERTIES. In: YAM, Kit L.. **ENCYCLOPEDIA OF PACKAGING TECHNOLOGY**. 3. ed. Estados Unidos: Wiley, 2009. p. 993-1000.

HILAL, Nidal; ISMAIL, Ahmad Fauzi; WRIGHT, Chris. **Membrane Fabrication**. Boca Raton: Crc Press Taylor & Francis Group, 2015. 758 p.

HORNE, Richard. ON THE DESKTOP: DRIVEN BY OPEN SOURCE. **Disruptive Magazine**, Issue 5, p.21-32, out. 2015.

HORVATH, Joan; CAMERON, Rich. **3D Printing with MatterControl**. Apress, 2015.

HUANG, Bin. **Alternate Slicing and Deposition Strategies For Fused Deposition Modelling**. 2014. Doctor of Philosophy – School of Engineering, Auckland University of Technology, 2014.

HUANG, Bai et al. Study of Processing Parameters in Fused Deposition Modeling Based on Mechanical Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Filament. **Polymer Engineering and Science**, [S.I.], v. 59, n. 1, p.120-128. 2019.

HULL, Charles W. Apparatus for Production of Three-dimensional Objects by Stereolithography. UVP, assignee. Patent US 4575330 A. March 11, 1986.

İPEKÇİ, Ahmet; KAM, Menderes; SARUHAN, Hamit. Investigation of 3D Printing Occupancy Rates Effect on Mechanical Properties and Surface Roughness of PET-G Material Products. **Journal of New Results In Science (JNRS)**, [S.I.], v. 7, n. 2, p.1-8. 2018.

IZADIAN, Afshin. Intelligent Model-Based Fault Diagnosis of MEMS. In: TIWARI, Atul; RAJ, Baldev. **Materials and Failures in MEMS and NEMS**. Salem, Massachusetts.: Scrivener Publishing llc, 2015. Cap. 2. p. 21-61.

JARVIS, Daniel L.. Polyacetals. In: GILBERT, Marianne. **Brydson's Plastics Materials**. 8. ed. Elsevier, 2017. Cap. 19. p. 513-526.

JAYAKUMAR, R., et al. Synthesis and characterization of metal-containing polyurethanes with antibacterial activity. **Journal of Applied Polymer Science**, [S.I.], v.85, n.6, pp. 1194-1206.2002.

JELIHOVSCHI, E.g.; FARIA, J.c.; ALLAMAN, I.b.. ScottKnott: A Package for Performing the Scott-Knott Clustering Algorithm in R. **Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**. [S.I.], v.15, n.1, p. 3-17. 2014.

Jl, Sang Gyu et al. Influence of electron beam treatment of jute on the thermal properties of random and two-directional jute/poly (lactic acid) green composites. **Journal of Adhesion Science and Technology**, [S.I.], v. 27, n. 12, p. 1359-1373. 2013.

JODEH, Shehdeh. Carrier films behavior during thermoforming process studied using dynamic mechanical thermal analysis (DMTA). **Journal of Polymer Research**, [S.I.],v. 18, n. 5, p. 939-944. 2011.

JONES, Rhys et al. RepRap—the replicating rapid prototyper. **Robotica**, [S.I.], v. 29, n. 01, p. 177-191. 2011.

KACZMAREK, H.; VUKOVIĆ-KWIATKOWSKA, I.. Preparation and characterization of interpenetrating networks based on polyacrylates and poly(lactic acid). **Express Polymer Letters**, [S.I.], v. 6, n. 1, p.78-94. 2012.

KALITA, Samar Jyoti et al. Development of controlled porosity polymer-ceramic composite scaffolds via fused deposition modeling. **Materials Science and Engineering: C**, [S.I.], v. 23, n. 5, p. 611-620. 2003.

KAMRANI, Ali K.; NASR, Emad Abouel. **Engineering design and rapid prototyping**. Springer Science & Business Media, 2010.

KATZ, Harry S.; MILEWSKI, John V.. **Handbook of Fillers for Plastics**. New York: van Nostrand Reinhold, 1987. 473 p. Disponível em: <[https://books.google.pt/books?id=zKMiAEVWgUIC&pg=PR7&lpg=PR7&dq=Handbook+of+Fillers+for+Plastics&source=bl&ots=wDd3uCnjDM&sig=1H1VDHOvVfgV207\\_bo4G\\_5DxZdY&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwiRia2D\\_LXWAhUBkBQKHYYx\\_BxoQ6AEIYzAI#v=onepage&q=Handbook+of+Fillers+for+Plastics&f=false](https://books.google.pt/books?id=zKMiAEVWgUIC&pg=PR7&lpg=PR7&dq=Handbook+of+Fillers+for+Plastics&source=bl&ots=wDd3uCnjDM&sig=1H1VDHOvVfgV207_bo4G_5DxZdY&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwiRia2D_LXWAhUBkBQKHYYx_BxoQ6AEIYzAI#v=onepage&q=Handbook+of+Fillers+for+Plastics&f=false)>. Acesso em: 23 jun. 2017.

KAVEH, Mahdi et al. Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.I.], v. 226, p. 280-286. 2015.

KISTER, G; CASSANAS, G; VERT, M. Effects of morphology, conformation and configuration on the IR and Raman spectra of various poly(lactic acid)s. **Polymer**, [S.I.], v. 39, n. 2, p.267-273. 1998.

KLAHN, Christoph; SINGER, Daniel; MEBOLDT, Mirko. Design Guidelines for Additive Manufactured Snap-Fit Joints. In: **CIRP DESIGN CONFERENCE**, 26., 2016, Stockholm: Elsevier B.v., 2016. p. 1 - 7. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/303984390>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

KLÖCKNER PENTAPLAST GROUP. **Comparative analysis of polymer roll-fed shrink-label substrates**. Klöckner Pentaplast Group, 2015. 10 p.

KONG, Lingyun et al. Pore characterization of 3D-printed gypsum rocks: a comprehensive approach. **Journal of Materials Science**, [S.I.], v. 53, n. 7, p.5063-5078, 2018.

KOVACS, Robert et al. TrussFab: Fabricating Sturdy Large-Scale Structures on Desktop 3D Printers. In: CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS, 17., 2017, Denver. **Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. Association For Computing Machinery, Inc. (acm), 2017. p. 2606 - 2616. Disponível em: <<https://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3025453.3026016>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

KRETSCHKEK, David. **Desenvolvimento de um Cabeçote de Extrusão por Êmbolo para Polipropileno Granulado Visando a Manufatura Aditiva**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

KULKARNI, Prashant; DUTTA, Debasish. Deposition strategies and resulting part stiffnesses in fused deposition modeling. **Journal of manufacturing science and engineering**, [S.I.], v. 121, n. 1, p. 93-103. 1999.

KUMAR, Mukesh et al. Effect of glycidyl methacrylate (GMA) on the thermal, mechanical and morphological property of biodegradable PLA/PBAT blend and its nanocomposites. **Bioresource Technology**, [S.I.], v. 101, n. 21, p.8406-8415, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.075>.

KUMAR, S. Dinesh; KANNAN, V. Nirmal; SANKARANARAYANAN, G. Parameter Optimization of ABS-M30i Parts Produced by Fused Deposition Modeling for Minimum Surface Roughness. **International Journal of Current Engineering and Technology**, [S.I.], v. 3, p. 93-97. 2014.

KUMAR, Ashish et al. Compatibility confirmation and refinement of thermal and mechanical properties of poly (lactic acid)/poly (ethylene- co -glycidyl methacrylate) blend reinforced by hexagonal boron nitride. **Reactive and Functional Polymers**, [S.I.], v. 117, p.1-9. 2017.

LAM, K. L. et al. Amorphous copolyester/polyoxymethylene blends: Thermal, mechanical and morphological properties. **KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe**, [S.I.], v. 57, n.11, p. 570-578. 2004.

LANDAU, Kurt; LANDAU, Uwe; SALMANZADEH, Hamed. Productivity Improvement with Snap-Fit Systems. In: **Industrial Engineering and Ergonomics**. Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 595-608.

LANZOTTI, Antonio; GRASSO, Marzio; STAINO, Gabriele, MARTORELLI, Massimo. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. **Rapid Prototyping Journal**, [S.I.], v. 21, n.5, p. 604 – 617. 2015a.

LANZOTTI, Antonio; MARTORELLI, Massimo; STAIANO, Gabriele. Understanding Process Parameter Effects of RepRap Open-Source Three-Dimensional Printers Through a Design of Experiments Approach. **Journal Of Manufacturing Science And Engineering**, [S.I.], v. 137, n. 1, p.011017-1- 011017 -7. 2015b.

LASAGNI, Fernando et al. Getting confidence for flying additive manufactured hardware. **Progress in Additive Manufacturing**, [S.I.], v. 1, n. 3-4, p.129-139. 2016.

LEAL-JUNIOR, A. et al. Dynamic mechanical characterization with respect to temperature, humidity, frequency and strain in mPOFs made of different materials. **Optical Materials Express**, [S.I.], v.8, n.4, p.804-815, 7 mar. 2018. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/ome.8.000804>

LEE, S.W. et al. Synthesis and thermal properties of poly(cyclohexylene di-methylene terephthalate-co-butylene terephthalate). **Korea Polymer Journal**, [S.I.], v.8, n.6, pp. 261-267. 2000.

LEE, John; HUANG, Adam. Fatigue analysis of FDM materials. **Rapid Prototyping Journal**, v. 19, n. 4, p. 291-299, 2013.

LEE, Chul. **Improving Snapfit Design (Part 4)**. 2009. Disponível em: <<http://knowledge.ulprospector.com/1258/pe-snapfit-4/#aboutauthor>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

LEVIN, Jack; FOX, James Alan; FORDE, David R.. **Estatística para ciências humanas**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

LIU, Frank W.. **Rapid prototyping and engineering applications: A Toolbox for Prototype Development**. Boca Raton: Crc Press Taylor & Francis Group, 2008.

LIMA, Marcos Vinícios Alves de. **Modelo de Fatiamiento Adaptativo para Prototipagem Rápida - Implementação no Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

LOCKER, Anatol. **PETG Filament for 3D Printing: Explained & Compared**. 2016. Disponível em: <<https://all3dp.com/petg-filament-3d-printing/>>. Acesso em: 04 ago. 2016.

LOCKER, Anatol. **PET Your Printer: 3D Printing with PETG Filament – All You Need to Know in 2019**. 2019. Disponível em: <<https://all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/#section-petg-filament-explained-and-compared>>. Acesso em: 9 fev. 2019.

LORANDI, Natalia P. et al. Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos. **Scientia Cum Industria**, [S.I.], v.4, n.13, p.48-60. 2016.

LUO, R. C., TZOU, J. H., HSIEH, C. Y., & CHOU, H. H. **The development of a thermal extrusion based rapid prototyping mechatronics system**. In: IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the]. IEEE. p. 2237-2242. 2002.

LUŽANIN, Ognjan; MOVRIN, Dejan; PLANČAK, Miroslav. Effect of layer thickness, deposition angle, and infill on maximum flexural force in FDM-built specimens. **Journal for Technology of Plasticity**, [S.I.], v. 39, n. 1. 2014.

MAGALHÃES, Laurence Colares. **A Influência dos Parâmetros Construtivos no Comportamento Mecânico de Peças Fabricadas pela Técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)**. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MAI, Thi Thu Trang et al. A novel nanofiber Cur-loaded polylactic acid constructed by electrospinning. **Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology**, [S.I.], v. 3, n. 2, 025014-4 (4pp). 2012.

MAIA, Izaque Alves; OLIVEIRA, Marcelo Fernandes de; NETO, Paulo Inforçatti; PEREIRA, Frederico David Alencar de Sena; SILVA, Jorge Vicente Lopes da. **Exploração de Recursos de Impressão 3D Para Peças Especiais**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2013, Penedo, Itatiaia-RJ.

MALONE E., LIPSON H.: Fab@Home:The personal desktop fabricator kit, **Rapid Prototyping Journal**, v.13. n. 4, p. 245-255, 2007.

MARTINS, Silvio Roberto Montenegro; BRANILSON, Luiz Santos Costa, HERMAN, Augusto Lepikson. **Um Sistema CAM Para Máquinas de Prototipagem Rápida de Baixo Custo**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010, Campina Grande-PB.

MARK, James E.. **Physical Properties of Polymers Handbook**. 2. ed. New York: Springer Science + Business Media Llc, 2007.



MATTERHACKERS. **How to Succeed when Printing with PETG Filament**. 2016. Disponível em: <<https://www.matterhackers.com/news/how-to-succeed-when-printing-with-petg-filament>>. Acesso em: 9 fev. 2019.

MENARD, Kevin P. **DYNAMIC MECHANICAL ANALYSIS: A Practical Introduction**. 2. ed. Boca Raton: Crc Press Taylor & Francis Group, 2008.

MENG, Bing et al. Transparent and ductile poly (lactic acid)/poly (butyl acrylate)(PBA) blends: Structure and properties. **European Polymer Journal**, [S.I.], v. 48, n. 1, p. 127-135. 2012.

MINETOLA, P.; GALATI, M.. A challenge for enhancing the dimensional accuracy of a low-cost 3D printer by means of self-replicated parts. **Additive Manufacturing**, [S.I.], v. 22, p.256-264. 2018.

MOHAMED, Omar A.; MASOOD, Syed H.; BHOWMIK, Jahar L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. **Advances in Manufacturing**, [S.I.], v. 3, n. 1, p. 42-53. 2015.

MOHAMED, Omar Ahmed et al. Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [S.I.], v.25, n.7, p. 2992-2935. 2016.

MOSKALA, E. J. Fatigue resistance of impact-modified thermoplastic copolyesters. **Journal of materials science**, [S.I.], v. 31, n. 2, p. 507-511. 1996.

MUEHLENFELD, Christian; ROBERTS, Simon A.. 3D/4D Printing in Additive Manufacturing: Process Engineering and Novel Excipients. In: MANIRUZZAMAN, Mohammed (Ed.). **3D and 4D Printing in Biomedical Applications: Process Engineering and Additive Manufacturing**. Weinheim, Germany: Wiley, 2019. Cap. 1. p. 1-23.

MURO FRAGUAS, Ignacio et al. Mejora de la adhesión en la impresión 3d mediante plasma atmosférico. In: 22<sup>nd</sup> INTERNATIONAL CONGRESS ON PROJECT MANAGEMENT AND ENGINEERING, 22., 2018, Madrid. **Anais do CIDIP 2018**, p. 999 - 1010. Disponível em: <<http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/1721>>. Acesso em: 18 dez. 2018.

NAKAMURA, H. et al. Formation of triangular polymer domains in sur-face films adsorbed on solid substrate. **Journal of Oleo Science**, [S.I.], v.51, n.12, pp. 781-787. 2002.

NANCHARAI, T.; RAJU, D. Ranga; RAJU, V. Ramachandra. An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components. **International Journal on Emerging Technologies**, [S.I.], v. 1, n. 2, p. 106-111. 2010.

NANTHANANON, P et al. Enhanced crystallization of poly (lactic acid) through reactive aliphatic bisamide. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 87, 012067, 16 jul. 2015.

OLIVEIRA, Robson Morijo de. **COMPÓSITO DE POLIURETANO ELASTOMÉRICO REFORÇADO COM FIBRA DE JUTA: ESTUDO DAS PROPRIEDADES DINÂMICO-MECÂNICAS E VISCOELÁSTICAS**. 2013. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-

graduação em Ciências dos Materiais, Centro de Ciências e Tecnologias Para A Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

ONWUBOLU, Godfrey C.; RAYEGANI, Farzad. Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process. **International Journal of Manufacturing Engineering**, [S.I.], v. 2014. 2014.

PAGE, Chris et al. Optimizing 3D printed components: a methodological approach to assessing print parameters on tensile properties, In: **Proceedings of ANTEC® 2017**, Anaheim, 2017, pp. 82-88.

PALLAROLAS, Ernesto Abel Fernando Friedmann. 2013. **Revisão Técnica de Processos de Manufatura Aditiva e Estudo de Configurações Para Estruturas de Impressoras Tridimensionais**. Monografia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

PAPON, Easir Arafat; HAQUE, Anwarul. Tensile properties, void contents, dispersion and fracture behaviour of 3D printed carbon nanofiber reinforced composites. **Journal of Reinforced Plastics And Composites**, [S.I.], v. 37, n. 6, p.381-395. 2018. SAGE Publications.

PASZKIEWICZ, Sandra et al. Synthesis and characterization of poly(ethylene terephthalate-co-1,4-cyclohexanedimethylene terephthalate)-block-poly(tetramethylene oxide) copolymers. **RSC Advances**, [S.I.], v. 7, n. 66, p.41745-41754. 2017.

PATEK, S. N.; BAIQ, J. E. The acoustic mechanics of stick-slip friction in the California spiny lobster (*Panulirus interruptus*). **Journal of Experimental Biology**, [S.I.], v. 210, n. 20, p. 3538-3546. 2007.

PATHADE, Er HP; KULKARNI, P. C. A Parametric Study of Additive Manufacturing Process. **International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology**, v.3, n. 1, p. 240-245, 2016. Disponível em: <http://www.ijarset.com/upload/2016/si/ICAME-16/IARJSET-ICAME%2046.pdf>, acesso em: 26 de julho de 2016.

PEARCE, Joshua M. Building research equipment with free, open-source hardware. **Science**, 337(6100):1303-4; 2012.

PEARCE, Joshua M.. **Open-Source Lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs**. Usa: Elsevier Inc., 2014. 274 p.

PEREIRA, Robson Bruno Dutra. **Influência do quebra-cavaco na dinâmica do torneamento do aço ABNT 1045**. 2011. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-rei, São João del Rei, 2011.

PEREZ, Angel R. Torrado; ROBERSON, David A.; WICKER, Ryan B. Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, [S.I.], v. 14, n. 3, p. 343-353. 2014.

PERSSON, Bo N. J.. **Sliding Friction: Physical Principles and Applications**. 2. ed. Berlin: Springer-verlag, 2000

PFEIFER, Thomas et al. OPTIMIZATION OF THE FDM™ ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS. In: **SPE ANTEC™ Indianapolis 2016**, 2016.

PHAM, Duc Truong; GAULT, Rosemary S. A comparison of rapid prototyping technologies. **International Journal of machine tools and manufacture**, [S.I.], v. 38, n. 10, p. 1257-1287. 1998.

PITT, Leyland F. et al. The penguin's window: Corporate brands from an open-source perspective. **Journal of the Academy of Marketing Science**, [S.I.], v. 34, n. 2, p. 115-127. 2006.

POLAK, Roman; SEDLACEK, Frantisek; RAZ, Karel. Determination of FDM Printer Settings with Regard to Geometrical Accuracy. **Daaam Proceedings**, p.0561-0566, 2017.

PRESOTTI, Cátia Valéria; BARRETO, Maria Cecília Mendes. Uma modificação da extensão do algoritmo AID e do teste Scott-Knott para modelos lineares generalizados usando reamostragem bootstrap. **Rev. Bras. Biom**, [S.I.], v. 27, n. 4, p. 548-585. 2009.

PROSPECTOR. **Polylactic Acid (PLA) Typical Properties**. [2016]. Disponível em: <<https://plastics.ulprospector.com/generics/34/c/t/polylactic-acid-pla-properties-processing>>. Acesso em: 04 ago. 2016.

QUAN, Zhenzhen et al. Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: opportunities and challenges. **Materials Today**, [S.I.], v. 18, n. 9, p. 503-512. 2015.

RAHMAN, Habibur et al. Investigation on the Scale Factor applicable to ABS based FDM Additive Manufacturing. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 1, p.1640-1648, 2018.

RAMLI, F. R. et al. Dimensional Accuracy and Surface Roughness of Part Features Manufactured by Open Source 3D Printer. **Arpn Journal Of Engineering And Applied Sciences**, [S.I.], v. 13, n. 3, p.1139-1144, fev. 2018.

RAYEGANI, Farzad; ONWUBOLU, Godfrey C. Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.I.], v. 73, n. 1, p. 509-519. 2014.

RAYNA, Thierry; STRIUKOVA, Ludmila. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. **Technological Forecasting and Social Change**, [S.I.], v. 102, p. 214-224. 2016.

REDWOOD, Ben; SHÖFFER, Filemon; GARRET, Brian. **The 3D Printing Handbook**: Technologies, design and applications. Amsterdam: 3d Hubs B.v, 2017.

RIDOLFI, Sara. **Il senso della Z**: Uno studio tassonomico delle potenzialità espressivo-sensoriali della stampa 3D FDM. 2013. 194 f. Tesi Specialistiche/Magistrali - Scuola del Design, Cdlm Design & Engineering, Politecnico di Milano, Milão, 2014.

RIVA, Federico. **Superficie inAttesa**: Processi di finitura superficiale per stampa 3D FDM. 2013. 214 f. Tesi Specialistiche/Magistrali - Corso di Laurea In Design & Engineering, Scuola del Design, Politecnico di Milano, Milano, 2013.

RODRIGUEZ, J. F.; THOMAS, J. P.; RENAUD, J. E. Characterization of the Mesostructure of Fused - Deposition Acrylonitrile – Butadiene – Styrene Materials. **Rapid Prototyping Journal**, [S.I.], v. 6, n. 3, p. 175 – 185. 2000.

ROBELLER, Christopher; MAYENCOURT, Paul; WEINAND, Yves. Snap-fit Joints-CNC fabricated, Integrated Mechanical Attachment for Structural Wood Panels. In: **ACADIA 2014 Design Agency: Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture**. Riverside Architectural Press, 2014. p. 189-198.

ROBINOWICZ, E. **The Friction and Wear of Materials**. New York: Wiley, 1965.

ROHRINGER, Sean. **The Ultimate Filament Guide**: 3D Printer Filament Guide – All You Need to Know in 2019. 2019. Disponível em: <<https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>>. Acesso em: 9 fev. 2019

SABINO NETTO, Aurélio da Costa et al. Avaliação de corpos de prova produzidos em PLA por manufatura aditiva por extrusão e moldagem por injeção. In: 13º CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2017, Lisboa. **Anais do CIBEM**. 2017

SAFAK, Serife; KARACA, Esra. Production and characterization of poly(ethylene terephthalate) nanofibrous mat including tourmaline additive. **Textile Research Journal**, [S.I.], v. 86, n. 15, p.1651-1658, 22 jul. 2016.

SALMANZADEH, Hamed; RASOULI, Mohammad. The Influence of Effective Factors on Mechanical Stress on Fingertips during Snap-fit Assembly. **Iranian Rehabilitation Journal**, [S.I.], v. 13, n. 3, p. 39-47. 2015.

SANCHEZ, Fabio Alberto Cruz et al. Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing: This paper proposes a benchmarking model for evaluating accuracy performance of 3D printers. **Virtual and Physical Prototyping**, [S.I.], v. 9, n. 3, p. 151-167. 2014.

SANTANA, Leonardo. **Avaliação de Uma Impressora 3D Baseada em Projeto de Código Aberto na Fabricação de Peças em PLA**. 2015. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica., Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SANTANA, Leonardo et al. Avaliação da Composição Química e das Características Térmicas de Filamentos de PLA para Impressoras 3d de Código Aberto. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA (CONEM), 9., 2016, Fortaleza. **Anais do CONEM 2016**. Fortaleza: 2016.

SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino; NETTO, Aurélio da Costa Sabino. Aplicação da Impressão 3D de Baixo Custo na Fabricação de Peças com Conexões Snap-Fit. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 9., 2017, Joinville.

**Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Joinville, 2017: ABCM, 2017a.

SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino; NETTO, Aurélio da Costa Sabino. A study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality. **Materials & Design**, v. 135, p.159-172. 2017b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.020>>. Acesso em: 14 set. 2017

SANTANA, Leonardo et al. Evaluating the deposition quality of parts produced by an open-source 3D printer. **Rapid Prototyping Journal**, [S.I.], v. 23, n. 4, p. 796-803. 2017c.

SANTANA, Leonardo et al. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 4. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0601>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

SANTOSO, Stephanie M.; HORNE, Benjamin D.; WICKER, Stephen B.. **Destroying by Creating: Exploring the Creative Destruction of 3D Printing Through Intellectual Property**. [s.i.]: X, 2013. Disponível em: <[https://ptolemy.berkeley.edu/projects/truststc/education/reu/13/Papers/HorneB\\_Paper.pdf](https://ptolemy.berkeley.edu/projects/truststc/education/reu/13/Papers/HorneB_Paper.pdf)>. Acesso em: 3 mar. 2019.

SAYBOLT, Michael. **Enhanced Calibration of a Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printer**. Michigan: Michigan State University, 2015.

SAWYER, W. Gregory et al. Friction Modeling and Experimentation for Integral Fasteners for Injection Molded Parts. **Journal of Injection Molding Technology**, [S.I.], v. 1, n. 4, p.224-228, dez. 1997. Disponível em: <<http://nersp.osg.ufl.edu/~wsawyer/SnapFit.PDF>>. Acesso em: 18 dez. 2018.

SCAPINI, Patrícia. **MORFOLOGIA E PROPRIEDADES TÉRMICAS DE COMPOSTOS DE HDPE/EVA COM POSS**. 2008. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

SCOTT, Andrew Jhon; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, [S.I.], v.30, n.3, p. 507-512. 1974.

SEIDL, MARTIN et al. Optimization of Snap-Fit Designs with Rapid Prototype Technology Support. **MM Science Journal**, 2015.

SEPE, Michael P.. **Dynamic Mechanical Analysis: for Plastics Engineering**. Norwich,ny: Plastics Design Library - William Andrew Inc., 1998.

SILVA, Lucas Filipe Martins da; ALVES, Fernando Jorge Lino; MARQUES, António Torres. **Materiais de Construção**. Porto: Publindústria, 2013.

SINGH, Sunpreet et al. Optimization and reliability analysis to improve surface quality and mechanical characteristics of heat-treated fused filament fabricated parts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.I.], p.1-16. 2019.

SONG, Y. et al. Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA. **Materials & Design**, [S.I.], v. 123, n. 5, p.154-164. 2017.

SOOD, Anoop Kumar; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. **Materials & Design**, [S.I.], v. 30, n. 10, p. 4243-4252. 2009.

SOOD, Anoop Kumar; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. **Materials & Design**, [S.I.], v. 31, n. 1, p. 287-295. 2010.

SOOD, Anoop K.; OHDAR, Raj K.; MAHAPATRA, Siba S. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. **Journal of Advanced Research**, [S.I.], v. 3, n. 1, p. 81-90. 2012.

SOLVAY. **Snap-Fit Latch Design**. Solvay Specialty Polymers., 2013. 4 p. Disponível em: <[http://www.solvay.com/en/binaries/Snap-Fit-Latch-Design\\_EN-199452.pdf](http://www.solvay.com/en/binaries/Snap-Fit-Latch-Design_EN-199452.pdf)>. Acesso em: 05 maio 2016

SOUZA, Adriana Ribeiro de et al. Aplicação do Design For Assembly And Manufacturing (DFMA) do Projeto Conceitual de um Comedouro Automático para Cães. In: XXXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGEP), 2017, Joinville. **Anais do ENEGEP**. 2017.

SCHMITT, Mayka et al. Classification and quantification of pore shapes in sandstone reservoir rocks with 3-D X-ray micro-computed tomography. **Solid Earth**, [S.I.], v. 7, p.285-300. 2016.

SHARIFAH, I.S.S. et al. Thermal, Structural and Mechanical Properties of Melt Drawn Cur-loaded Poly(lactic acid) Fibers. **Procedia Engineering**, [S.I.], v. 184, p.544-551. 2017.

SHIH, Yeng-fong; HUANG, Chien-chung. Polylactic acid (PLA)/banana fiber (BF) biodegradable green composites. **Journal of Polymer Research**, [S.I.], v. 18, n. 6, p.2335-2340. 2011.

SPERLING, L.H. **INTRODUCTION TO PHYSICAL POLYMER SCIENCE**. 4. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

SPIE PROFESSIONAL. **Chuck Hull: Pioneer in Stereolithography**. 2013. Disponível em: <<https://spie.org/membership/spie-professional-magazine/spie-professional-archives-and-special-content/2013-january-spie-professional-archive/chuck-hull>>. Acesso em: 05 jul. 2016.

STEPHEN, A. O.; DALGARNO, K. W.; MUNGUIA, J. Quality assurance and process monitoring of fused deposition modelling made parts. In: **High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping**, Leiria, Portugal, 1-5 October, 2013. CRC Press, 2013. p. 31.

STAFF, P. D. L.. **Handbook of plastics joining: a practical guide**. William Andrew. ISO 690, 1997.

STRAIN, I. N. et al. Electrospinning of recycled PET to generate tough mesomorphic fibre membranes for smoke filtration. **Journal Of Materials Chemistry A**, [S.I.], v. 3, n. 4, p.1632-1640. 2015.

STRATASYS INC. (Minneapolis). Steven Scott Crump. **Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects**. US n. 5121329, 30 out.1989, 09 junho 1992.

STRATASYS. **FDM® Nylon 12**: Production-Grade Thermoplastic for Fortus 3D Production Systems. Usa: Stratasys Inc., 2013.

STRATASYS. **VeroGray: POLYJET TECHNOLOGY MATERIAL SPECIFICATIONS**. Stratasys Direct, Inc., 2015. Disponível em: <[https://www.objective3d.com.au/wp-content/uploads/2017/05/PolyJet\\_VeroGray\\_Material\\_Specifications.pdf](https://www.objective3d.com.au/wp-content/uploads/2017/05/PolyJet_VeroGray_Material_Specifications.pdf)>. Acesso em: 17 nov. 2018

STRATASYS. **FDM Nylon 12**: 3D print tough parts for advanced applications. [2016]. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/materials/fdm/nylon#content-slider-1>>. Acesso em: 27 jun. 2016.

SUN, Q. et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. **Rapid Prototyping Journal**, [S.I.], v. 14, n. 2, p.72-80. 2008.

SURI, Gaurav; LUSCHER, Anthony F. Evaluation metrics for the rating and optimization of snap-fits. **Research in Engineering Design**, [S.I.], v. 12, n. 4, p. 191-203. 2000.

SURI, Gaurav. **A Fundamental Investigation of Retention Phenomena in Snap-fit Features**. 2002. Tese de Doutorado. The Ohio State University.

TANIKELLA, Nagendra G.; WITTBRODT, Ben; PEARCE, Joshua M.. Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. **Additive Manufacturing**, [S.I.], v. 15, p.40-47. 2017

TICONA. **Designing With Plastic**: The Fundamentals. Ticona Engineering Plastics, 2006.

TORRES, Jonathan et al. Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives. **JOM**, [S.I.], v. 67, n. 5, p. 1183-1193. 2015.

TOROSSIAN, Kevin, BOURELL, David. Experimental study of snap-fits using additive manufacturing, In: 26TH ANNUAL INTERNATIONAL SOLID FREEFORM FABRICATION (SFF) SYMPOSIUM, Austin, TX, 2015, pp. 1794– 1803.

TRES, Paul A.. **Designing Plastic Parts for Assembly**. 7. ed. Munich: Hanser Publishers, 2014. 376 p.

TROUGHTON, Michael J. **Handbook of plastics joining: a practical guide**. William Andrew, 2008.

TRONVOLL, Sigmund A.; WELO, Torgeir; ELVERUM, Christer W.. The effects of voids on structural properties of fused deposition modelled parts: a probabilistic approach. **The**

**International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, n. 9-12, p.3607-3618, 2018.

TURNER, Brian N.; GOLD, Scott A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. **Rapid Prototyping Journal**, [S.I.], v. 21, n. 3, p. 250-261. 2015.

TYMRAK, B. M.; KREIGER, M.; PEARCE, Joshua M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. **Materials & Design**, [S.I.], v. 58, p. 242-246. 2014.

UDROIU, Razvan. APPLICATIONS OF POLYMER JETTING TECHNOLOGY FOR FUNCTIONAL TESTING OF THE INNOVATIVE PRODUCTS. **Academic Journal of Manufacturing Engineering**, [S.I.], v. 10, n. 3. 2012.

ULLMAN, David G.. **The Mechanical Design Process**. 4. ed. New York: Mcgraw-hill, 2010. 450 p.

VAHABLI, Ebrahim; RAHMATI, Sadegh. Hybrid estimation of surface roughness distribution in FDM parts using analytical modeling and empirical investigation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.I.], p. 1-17. 2016.

VALERGA, Ana et al. Influence of PLA Filament Conditions on Characteristics of FDM Parts. **Materials**, [S.I.], v. 11, n. 8, jul. 2018.

VASUDEVARAO, Bharath et al. Sensitivity of RP surface finish to process parameter variation. In: **Solid freeform fabrication proceedings**. 2000. p. 251-258.

VOLPATO, N.; AHRENS, C. H.; FERREIRA, C. V.; GÜNTHER, P.; CARVALHO, J. de; SANTOS, J R. L. dos; SILVA, J. V. L. da. **Prototipagem Rápida: Tecnologia e Aplicações**. Primeira Edição. São Paulo: Blücher, 2007. 244 p.

VOLPATO, Neri; OLIVEIRA, João Henrique Silveira Alves de; SOUZA, Tiago Rodrigo de. **A Process Planning Applicative for Rapid Prototyping Technology**. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, Ouro Preto-MG, 2005.

VOLPATO, Neri et al. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p.

WANG, Tian-Ming; XI, Jun-Tong; JIN, Ye. A model research for prototype warp deformation in the FDM process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.I.], v.33, n.11, p.1087-1096. 2007.

WANG, Xiangdong et al. Study on the effect of dispersion phase morphology on porous structure of poly (lactic acid)/poly (ethylene terephthalate glycol-modified) blending foams. **Polymer**, [S.I.], v. 54, n. 21, p.5839-5851. 2013.

WANG, Ming et al. Progress in Toughening Poly(Lactic Acid) with Renewable Polymers. **Polymer Reviews**, [S.I.], v. 57, n. 4, p.557-593, 8 fev. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15583724.2017.1287726>.



WARD, I.M.; WILDING, M.A.. Infra-red and Raman spectra of poly(m-methylene terephthalate) polymers. **Polymer**, [S.I.], v. 18, n. 4, p.327-335. 1977.

WELLER, Christian; KLEER, Robin; PILLER, Frank T. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. **International Journal of Production Economics**, [S.I.], v. 164, p. 43-56. 2015.

WEEREN, R. Van; AGARWALA, M.; JAMALABAD, V. R.; BANDYOPHADYAY, A.;VAIDYANATHAN, R.; LANGRANA, N.; SAFARI, A.; WHALEN, P.; DANFORTH, S.; BALLARD, C. **Quality of Parts Processed by Fused Deposition**. 1995. Disponível em: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1995/1995-37-Weeren.pdf> . Acesso em: 27 de setembro de 2018.

WOHLERS. **Wohlers Report 2018: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report**. USA: Wohlers Associates Inc., 2018.

WU, W. Z. et al. Manufacture and thermal deformation analysis of semicrystalline polymer polyether ether ketone by 3D printing. **Materials Research Innovations**, [S.I.], v.18, n.5. 2014.

WU, Wenzheng et al. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS. **Materials**, [S.I.], v. 8, n. 9, p. 5834-5846. 2015.

WU, Gaihong et al. Preparation and properties of heat resistant polylactic acid (PLA)/Nano-SiO<sub>2</sub> composite filament. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, [S.I.], v. 31, n. 1, p. 164-171. 2016.

WU, Wenzheng et al. Influence of Layer Thickness, Raster Angle, Deformation Temperature and Recovery Temperature on the Shape-Memory Effect of 3D-Printed Polylactic Acid Samples. **Materials**, [S.I.], v. 10, n. 8, p.970. 2017.

XU, F.; LOH, H. T.; WONG, Y. S. Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems. **Rapid Prototyping Journal**, [S.I.], v. 5, n. 2, p. 54-60.1999.

XU, Ruijie; XIE, Jiayi; LEI, Caihong. Influence of melt-draw ratio on the crystalline behaviour of a polylactic acid cast film with a chi structure. **Rsc Advances**, [S.I.], v. 7, n. 63, p.39914-39921. 2017.

YAMAN, Ulas. Shrinkage compensation of holes via shrinkage of interior structure in FDM process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.I.], v. 94, n. 5-8, p.2187-2197. 2018.

YANAMANDRAM, Venkat Mahesh Kumar; PANCHAL, Jitesh H. Evaluating the level of openness in open source hardware. In: **Product Development in the Socio-sphere**. Springer International Publishing, 2014. p. 99-1

YANG, Chuncheng et al. Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.I.], v. 248, p.1-7. 2017.

YANG, Leipeng et al. Experimental Investigations for Optimizing the Extrusion Parameters on FDM PLA Printed Parts. **Journal of Materials Engineering And Performance**, [S.I.], v. 28, n. 1, p.169-182. 2019.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A.. **Física Universitaria**. 12. ed. México: Pearson Educación, 2009. 1 v. Adaptación autorizada de la edición en idioma inglés, titulada University Physics with Modern Physics 12<sup>a</sup> ed., (capítulos 1-20) de Hugh D. Young, Roger A. Freedman; con la colaboración de A. Lewis Ford, publicada por Pearson Education, Inc., publicada como Addison-Wesley, Copyright © 2008. Todos los derechos reservados.

YUAN, Liu. A **Preliminary Research on Development of a Fiber-Composite, Curved FDM System**. 2008. 87 f. Degree of Master - Department of Mechanical Engineering, National University Of Singapore, Singapura.

YUNIARTO, Kurniawan et al. Infrared and Raman studies on polylactide acid and polyethylene glycol-400 blend. In: THE 3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY, Semarang, Indonesia. **AIP Conference Proceedings**. Aip Publishing, 2016. v. 1725, p. 020101-1 – 020101-6.

ZHAI, Wentao et al. A Study of the Crystallization, Melting, and Foaming Behaviors of Polylactic Acid in Compressed CO<sub>2</sub>. **International Journal of Molecular Sciences**, [S.I.], v. 10, n. 12, p.5381-5397, dez. 2009.

ZHANG, Yan et al. Thermal graft copolymerization-induced adhesion improvement of a FR-4®/PETG® laminate. **International journal of adhesion and adhesives**, [S.I.], v. 20, n. 2, p. 165-171, 2000.

ZHAO, Hai-ming et al. Inclined layer printing for fused deposition modeling without assisted supporting structure. **Robotics and Computer-integrated Manufacturing**, [S.I.], v. 51, p.1-13, jun. 2018.

ZINGG, Theodor. **Beitrag zur Schotteranalyse**. 1935. 141 f. Tese (Doutorado), Eth Zurich, Zürich, 1935.

## LITERATURA COMPLEMENTAR

---

ALBERTI, E. A.; SILVA, L. J.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Manufatura aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, n. 2, p. 190-198, 2014.

BELLINI, A. **Fused Deposition of Ceramics: A Comprehensive Experimental, Analytical and Computational Study of Material Behavior, Fabrication Process and Equipment Design**. 2002. Ph.D. Dissertation, Philadelphia, USA: Drexel University, 2002.

*Calibre Engineering Thermoplastics Basic Design Manual*, Supplier design guide (301-1040-1288), Dow Chemical Company, 1988.

CHEAH, C. M. et al. Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 25, n. 3-4, p. 308-320, 2005.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies**: rapid prototyping to direct digital manufacturing. 2010.

HUANG, Samuel H. et al. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 5-8, p. 1191-1203, 2013.

KARAPATIS, N. P.; VAN GRIETHUYSEN, J. P. S.; GLARDON, R. Direct rapid tooling: a review of current research. **Rapid Prototyping Journal**, v. 4, n. 2, p. 77-89, 1998.

KRUTH, J.-P.; LEU, Ming-Chuan; NAKAGAWA, T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 47, n. 2, p. 525-540, 1998.

PAUDYAL, Madhu. **A Brief Study on Three-Dimensional Printing Focusing on the Process of Fused Deposition Modeling**. 2015. 56 f. Bachelor's Degree - Degree Programme In Plastics Technology, Arcada - Nylands Svenska Yrkeshögskola, Finlândia, 2015.

RECHIA, Ahmed et al. Census and analysis of design solutions of 3d replicating rapid prototyper (regrap). In: **Xème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées**. 2015.

STANSBURY, Jeffrey W.; IDACAVAGE, Mike J. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. **Dental Materials**, v. 32, n. 1, p. 54-64, 2016.

WEST, Joel; KUK, George. The complementarity of openness: How MakerBot leveraged Thingiverse in 3D printing. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 102, p. 169-181, 2016.

WONG, Kaufui V.; HERNANDEZ, Aldo. A review of additive manufacturing. **ISRN Mechanical Engineering**, v. 2012, 2012.



# APÊNDICE A: TESTES ESTATÍSTICOS

A análise de variância referente ao estudo das geometrias vazadas encontra-se disponível na Tabela 48. Os resultados do teste de Tukey são apresentados na Tabela 49, sendo iguais às médias com a mesma letra.

Tabela 48 – Análise de variância (ANOVA,  $\alpha=95\%$ ) dimensões externas e internas.

Fator	ANOVA X externo						ANOVA Y externo					
	gl	SQ'	V	F	P	Pc	gl	SQ'	V	F	P	Pc
E <sub>d</sub>	2	0,176	0,096	12,15	0,00	10,34	2	0,380	0,203	16,04	0,00	17,29
N <sub>p</sub>	2	0,002	<i>Pooled</i>				2	-0,02	<i>Pooled</i>			
M <sub>t</sub>	2	1,324	0,670	84,74	0,00	77,62	2	1,491	0,758	59,92	0,00	67,76
Erro	22	0,206	0,008	1,00		12,05	22	0,329	0,013	1,00		14,95
Total	26	1,707				100	26	2,177				100
Fator	ANOVA X interno						ANOVA Y interno					
	gl	SQ'	V	F	P	Pc	gl	SQ'	V	F	P	Pc
E <sub>d</sub>	2	0,301	0,157	24,48	0,00	18,40	2	0,347	0,183	19,70	0,00	18,70
N <sub>p</sub>	2	-0,00	<i>Pooled</i>				2	0,002	<i>Pooled</i>			
M <sub>t</sub>	2	1,169	0,591	92,14	0,00	71,41	2	1,273	0,646	69,56	0,00	68,38
Erro	22	0,167	0,006	1,00		10,19	22	0,241				12,97
Total	26	1,636				100	26	1,863				100
Fator	ANOVA Z											
	gl	SQ'	V	F	P	Pc						
E <sub>d</sub>	2	0,484	0,256	18,44	0,00	27,74						
N <sub>p</sub>	2	-0,03	<i>Pooled</i>									
M <sub>t</sub>	2	0,899	0,463	33,43	0,00	51,58						
Erro	22	0,360	0,014	1,00		20,68						
Total	26	1,715				100						

Tabela 49 – Análise de Tukey ( $\alpha=95\%$ ) dimensões externas e internas.

Ed	N	X externo		Y externo		Mt	X externo		Y externo	
		Média	Grupo	Média	Grupo		Média	Grupo	Média	Grupo
45°/-45°	9	25,1	A	25,2	A	PLA n	25,3	A	25,3	A
0°/90°	9	24,9	B	25,0	B	PLA a	24,8	B	24,9	B
Conc.	9	24,9	B	24,9	B	PETG	24,8	B	24,8	B
		X interno		Y interno			X interno		Y interno	
		Média	Grupo	Média	Grupo		Média	Grupo	Média	Grupo
45°/-45°	9	14,7	A	14,6	A	PLA n	14,5	A	14,5	A
0°/90°	9	14,9	B	14,8	B	PLA a	15,0	B	14,9	B
Conc.	9	14,9	B	14,9	B	PETG	15,0	B	15,0	B
		Z					Z			
		Média	Grupo	Média	Grupo		Média	Grupo	Média	Grupo
45°/-45°	9	15,2	A			PLA n	15,2	A		
0°/90°	9	15,0	B			PLA a	15,2	A		
Conc.	9	14,9	B			PETG	14,8	B		

Na Tabela 50 é apresenta a análise de variância para as respostas obtidas no estudo de caracterização dos materiais. O teste de Tukey é disponibilizado na Tabela 51.

Tabela 50 – Análise de variância (ANOVA,  $\alpha=95\%$ ) estudo de caracterização dos materiais.

Fonte de variação	gl	ANOVA – $\sigma_{\text{máx}}$ (MPa) PLA					gl	ANOVA – $\sigma_{\text{máx}}$ (MPa) PETG				
		<i>SQ</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Pc</i>		<i>SQ</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Pc</i>
EG	2	406,2	203,1	251,6	0,00	97,3	2	436,5	218,2	194,4	0,00	96,5
DG	12	9,7	0,9	1		2,7	12	13,5	1,1	1		3,5
Total	24	415,9				100	24	450,0				100
Fonte de variação	gl	ANOVA $\epsilon_{\sigma\text{máx}}$ (mm/mm) PLA					gl	ANOVA $\epsilon_{\sigma\text{máx}}$ (mm/mm) PETG				
		<i>SQ</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Pc</i>		<i>SQ</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Pc</i>
EG	2	9E-6	5E-6	33,0	0,00	82,1	2	0,001	3E-4	271,1	0,00	97,5
DG	12	2E-6	1E-7	1		17,9	12	1E-5	1E-6	1		2,5
Total	14	1E-5				100	14	1E-3				100
Fonte de variação	gl	ANOVA – E (GPa) PLA					gl	ANOVA – E (GPa) PETG				
		<i>SQ</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Pc</i>		<i>SQ</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Pc</i>
EG	2	0,5	0,23	36,5	0,00	83,5	2	0,4	0,2	200,7	0,00	96,6
DG	12	0,1	0,01	1		16,5	12	0,0	0,001			3,4
Total	14	0,6				100	14	0,4				100
Fonte de variação	gl	ANOVA – Massa (g) PLA					gl	ANOVA – Massa (g) PLA				
		<i>SQ</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Pc</i>		<i>SQ</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Pc</i>
EG	2	0,4	0,2	68,0	0,00	90,5	2	0,1	0,04	15,2	0,00	66,95
DG	12	0,0	0,003			9,5	12	0,0	0,003			33,05
Total	14	0,4				100	14	0,1				100

Nota: entre grupos (EG), dentro dos grupos (DG), tensão máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ), deformação na tensão máxima ( $\epsilon_{\sigma\text{máx}}$ ), módulo de Young (E).

Tabela 51 – Teste Tukey estudo de caracterização dos materiais.

Diferença	Teste de Tukey – PLA Módulo de Young (GPa)			
	<i>Dif. entre médias</i>	<i>EP</i>	<i>IC de 95%</i>	<i>P</i>
C1 - C2	0,13	0,05	(-0,003; 0,268)	0,06
C3 - C2	0,42	0,05	(0,288; 0,559)	0,00
C3 - C1	0,29	0,05	(0,156; 0,456)	0,00
Diferença	Teste de Tukey – PLA Def. Tensão Máxima (mm/mm)			
	<i>Dif. entre médias</i>	<i>EP</i>	<i>IC de 95%</i>	<i>P</i>
C1 - C2	0,0018	0,0002	(0,0012; 0,0025)	0,00
C3 - C2	0,0004	0,0002	(-0,0002; 0,0010)	0,28
C3 - C1	-0,0014	0,0002	(-0,0021; -0,0008)	0,00
Diferença	Teste de Tukey – PLA Massa (g)			
	<i>Dif. entre médias</i>	<i>EP</i>	<i>IC de 95%</i>	<i>P</i>
C1 - C2	0,36	0,03	(0,275; 0,449)	0,00
C3 - C2	0,08	0,03	(-0,009; 0,165)	0,08
C3 - C1	-0,28	0,03	(-0,371; -0,197)	0,00
Diferença	Teste de Tukey – PETG Def. Tensão Máxima (mm/mm)			
	<i>Dif. entre médias</i>	<i>EP</i>	<i>IC de 95%</i>	<i>P</i>
C1 - C2	0,0128	0,0007	(0,0111; 0,0146)	0,00
C3 - C2	0,0139	0,0007	(0,0121; 0,0156)	0,00
C3 - C1	0,0010	0,0007	(-0,0008; 0,0028)	0,32
Diferença	Teste de Tukey – PETG Massa (g)			
	<i>Dif. entre médias</i>	<i>EP</i>	<i>IC de 95%</i>	<i>P</i>
C1 - C2	0,14	0,03	(0,055; 0,232)	0,00
C3 - C2	-0,03	0,03	(-0,115; 0,062)	0,72
C3 - C1	-0,17	0,03	(-0,258; -0,081)	0,00

Nas Tabelas 52 a 57 são apresentados os testes de *t-Student* para a comparação de média entre PLA e PETG, para os resultados do estudo do coeficiente de atrito estático. As hipóteses, nula ( $H_0$ ) e alternativa ( $H_1$ ), para o teste são descritas a seguir:

$$\begin{cases} H_0: \mu_1 = \mu_2 \\ H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \end{cases}$$

Se:  $|t|_{\text{calculado}} > t_{\text{tabelado}}$  rejeitar a hipótese nula (LEVIN *et al.*, 2012).

Tabela 52 – Teste de comparação de médias para PLA 0°|90° e PETG 45°|0°.

	PLA	PETG
<i>Média</i>	0,12	0,13
<i>Variância</i>	3,04E-5	2,77E-05
<i>Observações</i>	5	5
<i>Variância agrupada</i>	2,91E-05	
<i>Gl</i>	8	
t  calculado	3,22	
P	0,01	
t tabelado	2,31	

Tabela 53 – Teste de comparação de médias para PLA 0°|90° e PETG 0°|0°.

	PLA	PETG
<i>Média</i>	0,12	0,14
<i>Variância</i>	3,04E-5	3,65E-5
<i>Observações</i>	5	5
<i>Variância agrupada</i>	3,35E-5	
<i>Gl</i>	8	
t  calculado	6,70	
P	0,0002	
t tabelado	2,31	

Tabela 54 – Teste de comparação de médias para PLA 0°|90° e PETG 0°|90°.

	PLA	PETG
<i>Média</i>	0,12	0,14
<i>Variância</i>	3,04E-5	1,71E-4
<i>Observações</i>	5	5
<i>Variância agrupada</i>	1,01E-4	
<i>Gl</i>	8	
t  calculado	2,46	
P	0,04	
t tabelado	2,31	

Tabela 55 – Teste de comparação de médias para PLA 45°|45° e PETG 45°|45°.

	PLA	PETG
<i>Média</i>	0,23	0,17
<i>Variância</i>	1,28E-04	8,34E-05
<i>Observações</i>	5	5
<i>Variância agrupada</i>	1,06E-04	
<i>Gl</i>	8	
t  calculado	8,15	
P	3,82E-05	
t tabelado	2,31	

Tabela 56 – Teste de comparação de médias para PLA 90°|90° e PETG 90°|90°.

	PLA	PETG
<i>Média</i>	0,38	0,20
<i>Variância</i>	8,72E-04	1,39E-04
<i>Observações</i>	5	5
<i>Variância agrupada</i>	5,05E-04	
<i>Gl</i>	8	
t  calculado	12,22	
P	1,87E-06	
t tabelado	2,31	

Tabela 57 – Teste de comparação de médias para PLA 90°|90° e PETG 90°|45°.

	PLA	PETG
<i>Média</i>	0,38	0,21
<i>Variância</i>	8,72E-04	1,97E-04
<i>Observações</i>	5	5
<i>Variância agrupada</i>	5,34E-04	
<i>Gl</i>	8	
t  calculado	11,60	
P	2,77E-06	
t tabelado	2,31	

Nas Tabelas 58 e 59 são apresentados os resultados da comparação das médias da rugosidade das faces da “superfície de interação” e do “bloco padrão”, em PLA e PETG, ambas com filamentos depositados em 90°.

Tabela 58 – Teste de comparação de médias para as rugosidades, PLA.

	“Sup. interação” (90°)	“Bloco padrão” (90°)
<i>Média</i>	16,54	15,30
<i>Variância</i>	8,70	0,20
<i>Observações</i>	3	3
<i>Gl</i>	2	
t  calculado	0,72	
P	0,55	
t tabelado	4,30	

Tabela 59 – Teste de comparação de médias para as rugosidades, PETG.

	“Sup. interação” (90°)	“Bloco padrão” (90°)
<i>Média</i>	10,49	15,24
<i>Variância</i>	6,21	0,04
<i>Observações</i>	3	3
<i>Gl</i>	2	
t  calculado	-3,29	
P	0,08	
t tabelado	4,30	



## APÊNDICE B: ANÁLISE DOS VAZIOS

Nos gráficos das Figura 168 a 171 são apresentados os valores de diâmetro e esfericidade dos vazios encontrados na análise de tomografia dos machos impressos em PLA e PETG.

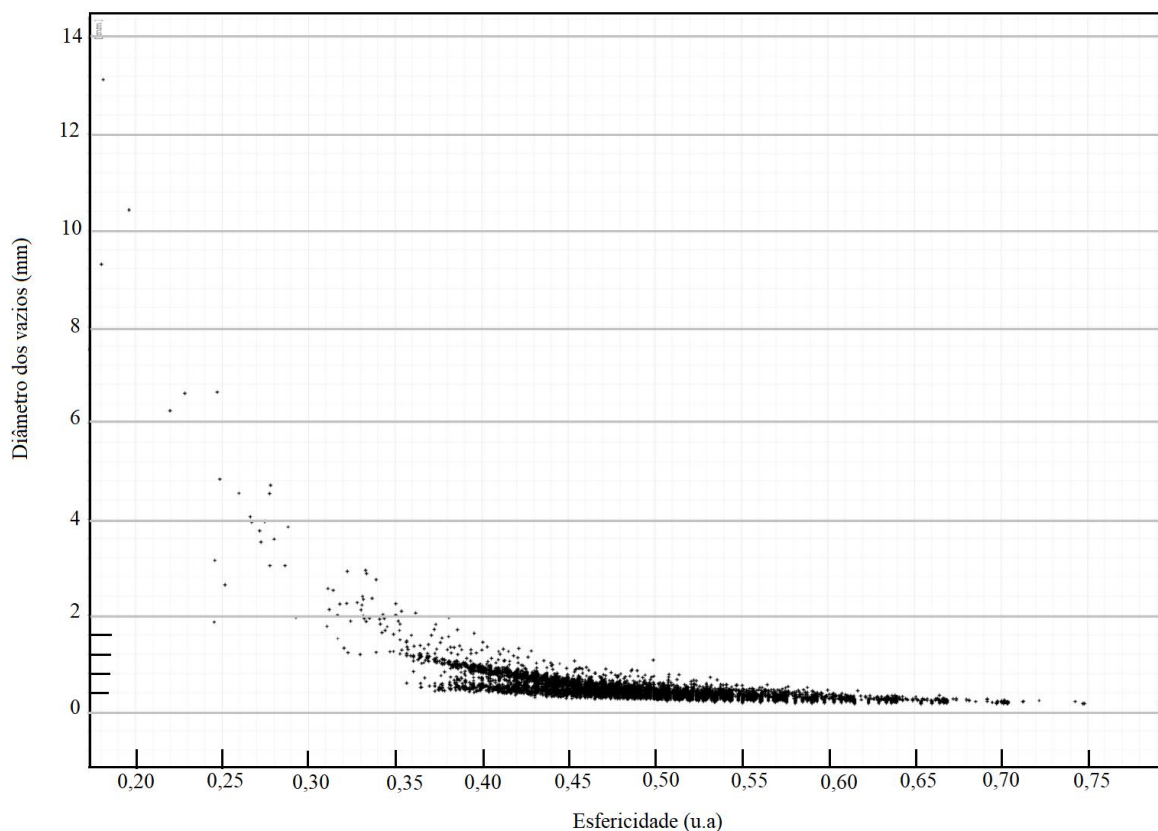


Figura 168 – Análise dos vazios: PLA macho, teste MC.

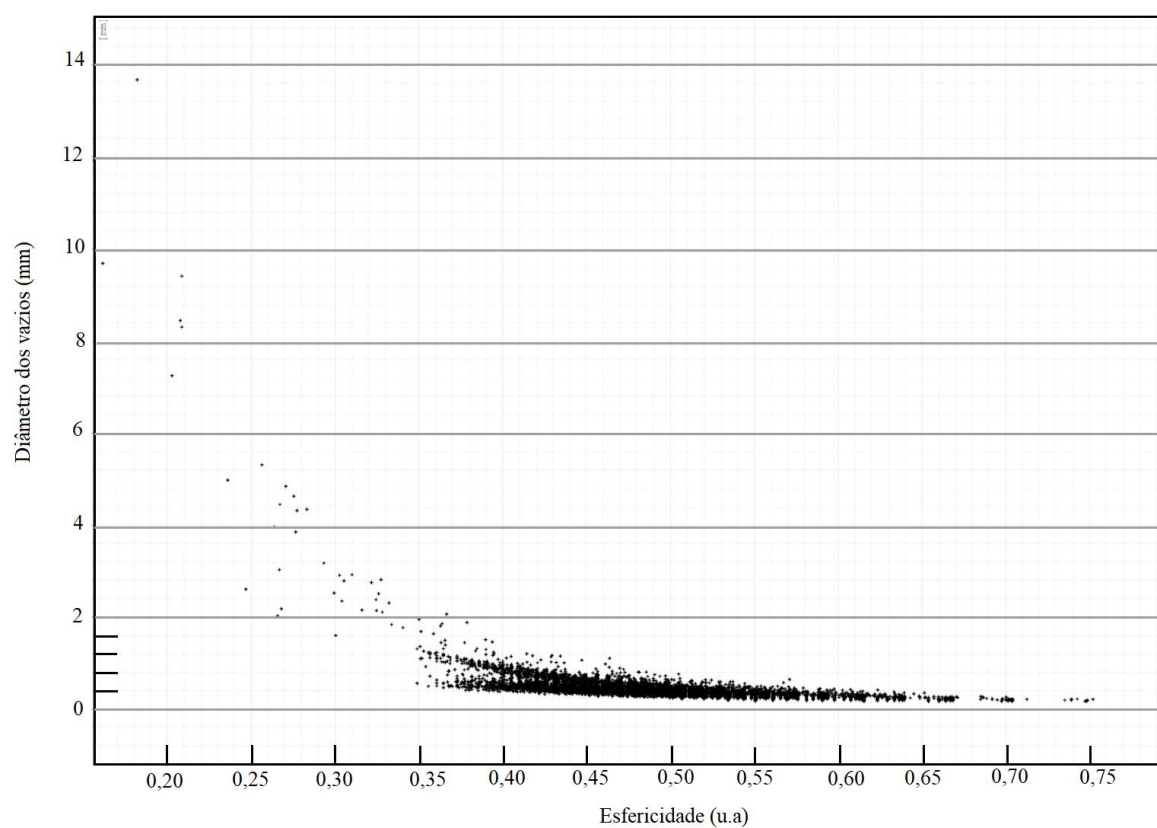


Figura 169 – Análise dos vazios: PLA macho, teste QM.

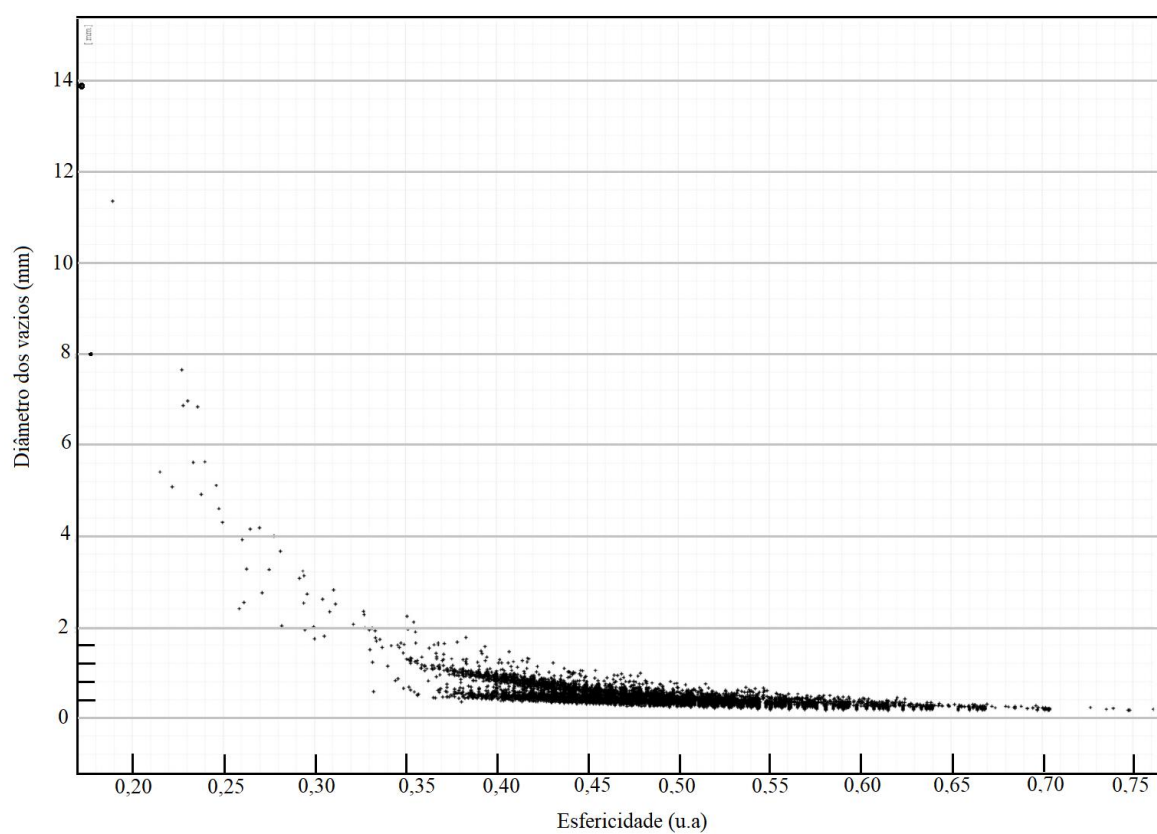


Figura 170 – Análise dos vazios: PETG macho, teste MC.

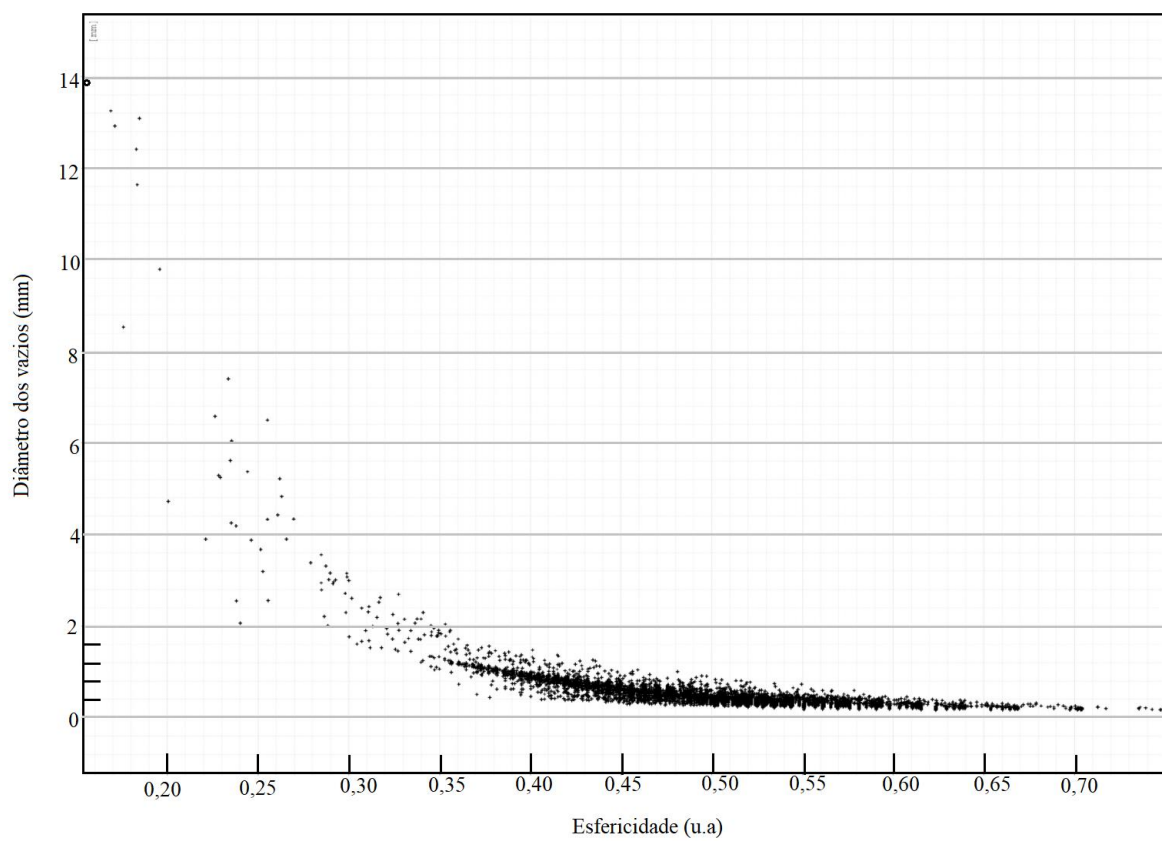


Figura 171 – Análise dos vazios: PETG macho, teste QM.



# APÊNDICE C: RELAÇÃO DE RECONHECIMENTO

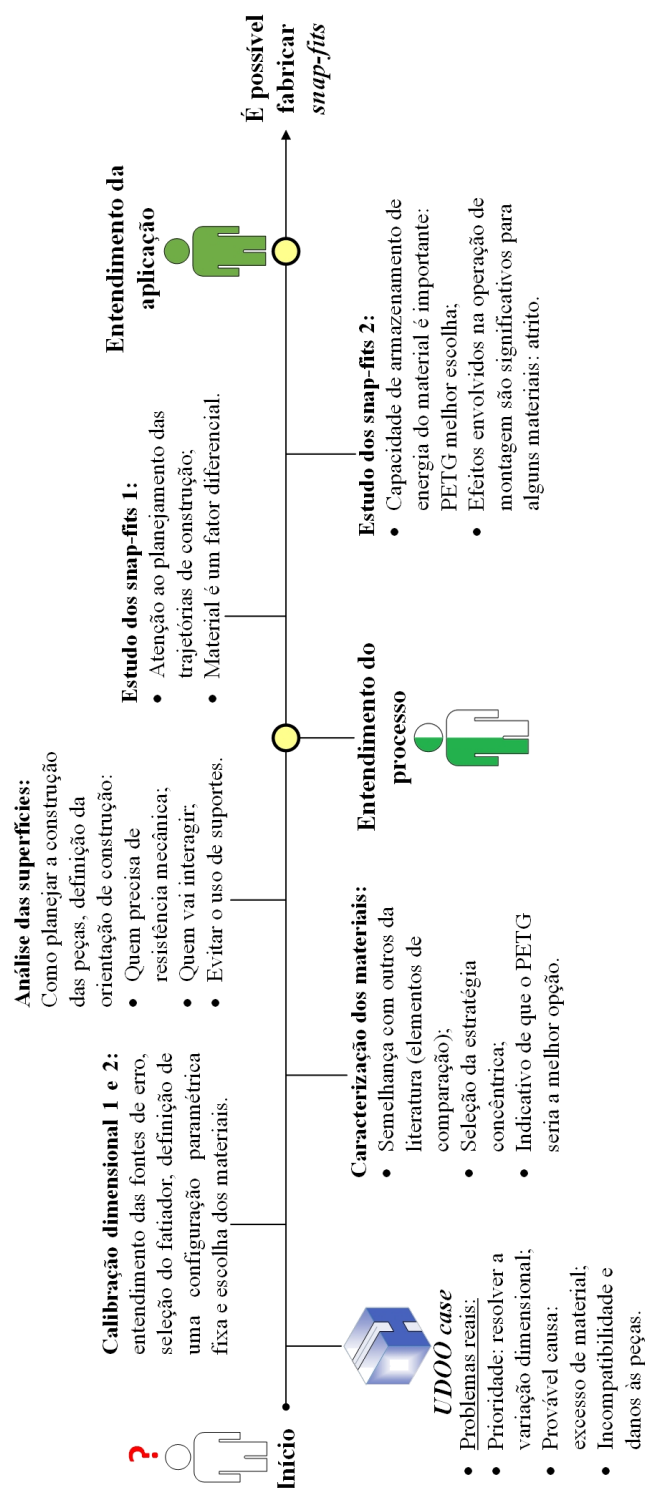


Figura 172 – Linha de pensamento: desenvolvimento da relação de reconhecimento usuário sistema de impressão.